

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

До захисту допущено:

В.о.зав. кафедри

_____ Сергій ЖУК

«__» _____ 20__ р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньою-професійною програмою
«Радіотехнічні інформаційні технології»
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
на тему: «Передавач завад засобам навігації БПЛА»**

Виконав (-ла):
студент (-ка) IV курсу, групи РТ-81

Прокопов Роман Олегович

Прізвище, ім'я та по батькові

підпис

Керівник:

Доц., к.т.н. Онисько Андрій Ілліч

Посада, науковий ступінь, вчене звання, Прізвище, ім'я та по батькові



підпис

Рецензент:

Доц. к.т.н., Лащевська Наталія Олександрівна

Посада, науковий ступінь, вчене звання, Прізвище, ім'я та по батькові

підпис

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2022 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіотехнічних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітньо-професійна програма «Радіотехнічні інформаційні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ЖУК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Прокопову Роману Олеговичу

1. Тема проєкту «Передавач завад засобам навігації БПЛА», керівник проєкту Онисько Андрій Ілліч, доц. к.т.н, затверджені наказом по університету від «1» червня 2022 р. № 822-с

2. Термін подання студентом проєкту 20 червня 2022 року

3. Вихідні дані до проєкту:

Спроектувати передавач завад засобам навігації БПЛА, з наступними технічними характеристиками:

1. Потужність в навантаженні 20 Вт;
2. Параметри навантаження $R = 50 \text{ Ом}$;
3. Робочі частоти – частоти навігаційних систем ГЛОНАСС, GPS.

4. Зміст пояснювальної записки:

Розділ 1: «СУЧАСНІ МЕТОДИ БОРОТЬБИ З БПЛА»

Розділ 2: «МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРОБКИ ПЕРЕДАВАЧА ЗАВАД»

Розділ 3: «РОЗРАХУНОК ПЕРЕДАВАЧА ЗАВАД»

Розділ 4: «РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ПІДСИЛЮВАЧА ІМПУЛЬСІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ РОБОТИ РЕМ»

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): схема структурна, схема електрична принципова, скадальний кресленик ЕМ, складальний кресленик пристрою.

6. Дата видачі завдання 01 травня 2022 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд сучасних методів боротьби з БПЛА	08.05.2022 – 15.05.2022	
2	Огляд методології розробки передавача завад	15.05.2022 – 22.05.2022	
3	Розрахунок передавача завад	22.05.2022 – 05.06.2022	
4	Розробка конструкції підсилювача імпульсів синхронізації роботи рем	05.06.2022 – 12.06.2022	
5	Графічна частина	12.06.2022 – 14.06.2022	
6	Подання проєкту	20.06.2022	

Студент

Роман ПРОКОПОВ

Керівник

Андрій ОНИСЬКО

АНОТАЦІЯ

В дипломному проєкті проведено аналіз сучасних методів боротьби з БПЛА, було встановлено, що найпростіший та найефективніший спосіб протидії беспілотним літальним апаратам є заглушення GNSS. Розроблено та розраховано передавач завад, який працює на частоті GSM(900 МГц). Розроблена друкована плата підсилювача імпульсів синхронізації РЕМ. Моделювання плат проводилося в програмному забезпеченні Altium Designer. Проектування корпусу виконано за допомогою середовища SolidWorks.

Ключові слова: методи боротьби з БПЛА, передавач завад, підсилювач імпульсів синхронізації, радіочастотні перешкоди.

ANNOTATION

The diploma project analyzed modern methods of UAV control and found that the simplest and most effective way to counter unmanned aerial vehicles is to block GNSS. An interference transmitter operating at GSM (900 MHz) frequency has been developed and calculated. The printed circuit board of the PEM synchronization pulse amplifier has been developed. Board simulation was performed in Altium Designer software. The design of the case is performed using the SolidWorks environment.

Keywords: UAV control methods, interference transmitter, synchronization pulse amplifier, radio frequency interference.

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему:
«Передавач завад засобам навігації БПЛА»

Київ — 2022 року

ЗМІСТ

Перелік скорочень	2
Вступ	4
1 СУЧАСНІ МЕТОДИ БОРОТЬБИ З БПЛА	5
1.1 Електронні нейтралізатори	6
1.1.1 Радіочастотні перешкоди	7
1.1.2 Радіоподавлення GNSS.....	9
1.1.3 Спуфінг.....	10
1.1.4 Нейтралізатори, що використовують атаки на основі протоколу та атаки повторення.....	11
1.1.5 Потужні електромагніти та лазери	13
1.2 Кінетико-механічні нейтралізатори.....	14
1.2.1 Нейтралізатори на основі снарядів	14
1.2.2 Зіткнення БПЛА.....	15
2 МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРОБКИ ПЕРЕДАВАЧА ЗАВАД.....	16
2.1 Огляд методології розробки передавача завад	16
2.2 Визначення технічних вимог до розробки структурної схеми передавача.....	18
2.3 Визначення технічних вимог до джерела живлення та розробка оптимального варіанту його структурної схеми	22

					РТ81. 648342.001 ПЗ			
ЗМ.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Передавач завад засобам навігації БПЛА	Літ.	Лист	Листів
Розробив	Прокопов					1		
Перевірів					РТ-81, РТФ			
Н. Контр.	Онисько							

3 РОЗРАХУНОК ПЕРЕДАВАЧА ЗАВАД.....	24
3.1 Розробка структурної схеми з орієнтовним вибором активних елементів всіх каскадів	24
3.2 Розробка технічних вимог до передавача та створення структурних схем джерел живлення	27
3.3 Розрахунок окремих вузлів передавача завод.....	29
3.3.1 Розрахунок кола колектора	29
3.3.2 Розрахунок кола бази.....	31
3.3.3 Розробка схем додавання та ділення потужностей.....	34
3.3.4 Розрахунок вузькосмугових вихідних схем узгодження на LC - елементах	35
3.4 Висновки за розрахунками.....	39
4 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ПІДСИЛЮВАЧА ІМПУЛЬСІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ РОБОТИ РЕМ.....	40
4.1 Опис схеми.....	40
4.2 Бібліотека компонентів для AD	41
4.3 Схема електрична принципова	43
4.4 Розрахунки	44
4.4.1 Розрахунок площі ДП.....	45
4.4.2 Розрахунок ширини провідників	45
4.5 Трасування ДП.....	46
4.6 Корпус	48
4.7 Висновки	49
Висновки.....	50

					PT81. 648342.001 ПЗ			
ЗМ.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Прокопов				Передавач завод засобам навігації БПЛА	Літ.	Лист	Листів
Перевірів							1	
Н. Контр.	Онисько				PT-81, РТФ			

Перелік джерел посилання.....	51
Додаток А	53
Додаток Б.....	54
Додаток В.....	55
Додаток Г	56
Додаток Д.....	57
Додаток Е.....	58
Додаток Є.....	60
Додаток Ж.....	61

					РТ81. 648342.001 ПЗ			
ЗМ.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Прокопов				Передавач завад засобам навігації БПЛА	Літ.	Лист	Листів
Перевірів							1	
Н. Контр.	Онисько				РТ-81, РТФ			

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АГ – автогенератор
АЕ – активний елемент
АМ – амплітудна модуляція
АФМ – амплітудно-фазова модуляція
АФП – антенно-фідерний пристрій
БПЛА – беспілотний літальний апарат
В – випрямляч
ВЧ – високі частоти
ГЗЗ – генератор із зовнішнім збудженням
ДЖ – джерело живлення
ЗЗ – коло зворотнього зв'язку
І – інвертор
КАМ – квадратурна амплітудна модуляція
ККД – коефіцієнтом корисної дії
КМ – кутова модуляція
КУ – коло узгодження
Мф – мережевий фільтр
ОМ – односмугова модуляція
РЧ - радіочастоти
Ст – стабілізатор напруги
СУ – схема узгодження
СЧ – синтезатор частоти
ТЗ – технічне завдання
Ф – фільтр
ФМ – фазова модуляція
ЧМ – частотна модуляція
UAS - Unmanned Aircraft Systems
AGC - automatic gain controller

					РТ81.648342.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		2

ARP - address resolution protocol
 DoS - denial-of-service
 DSSS - direct sequence spread spectrum
 FHSS - frequency hopping spread spectrum
 FPV - first-person view
 GNSS - Global Navigation Satellite System
 IMU - inertial measurement unit
 LOS - line of sight
 NIC - network interface controller
 RTH - return to home
 SINR - signal-to-interference-plus-noise ratio
 SDR - software-defined radio
 WAP - Wireless Application Protocol

					<i>PT81.648342.001 ПЗ</i>	<i>Лис</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		3

ВСТУП

Темою дипломного проєкту є Передавач завад засобам навігації БПЛА. Актуальність обраної теми полягає в удосконаленні сучасних аналогів та в потребі контролю території від несанкціонованого руху БПЛА. Тому в залежності від використання засобів навігації безпілотників є доцільним удосконалити систему, яка б дозволила нам перешкоджати руху безпілотних літальних апаратів по закритій території. Саме в цьому і полягає актуальність даного дипломного проєкту.

Об'єктами дослідження є передавачі завад на частотах систем ГЛОНАСС, GPS, GALILEO.

Дослідивши методологію побудови передавачів, було розроблено чотири передавачі завад та підсилювач імпульсів синхронізації. Підсилювач імпульсів синхронізації призначений для посилення імпульсного сигналу негативної полярності амплітудою мінус 20 мВ до рівня сумісного з логічними ІМС, наприклад серії 74НСхх. За допомогою передавачів завад, подавши більший сигнал за потужністю, ніж подає засіб навігації БПЛА, можна “придушити” можливість передавати сигнали управління від оператора, який керує БПЛА, до самого апарату. Пристрій може використовуватись для контролю зон навколо аеродромів, критичних об'єктів техногенної інфраструктури, а також для охорони державного кордону. В умовах ведення бойових дій можна використовувати для перешкодження розвідувальної діяльності ворога.

					<i>PT81.648342.001 ПЗ</i>	Лис
						4
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 СУЧАСНІ МЕТОДИ БОРОТЬБИ З БПЛА

За останні роки ринок дронів значно розширився, особливо в споживчому секторі. Дрони, призначені для цього ринку, легко доступні завдяки їх відносно невисокій вартості. Крім того, характеристики ваги, розміру та можливості переносити корисне навантаження, наприклад, камеру, дозволяють використовувати їх у різних сферах, від рекреаційного до професійного. Крім того, з дослідницької точки зору, використання цих літаючих платформ допомагає розробці технологій, застосування яких має позитивний вплив на суспільство, таких як пошуково-рятувальні операції, інтелектуальна логістика, моніторинг навколишнього середовища або точне землеробство.

З огляду на зростаюче використання цих технологій, необхідно враховувати питання, пов'язані з безпекою, безпекою та конфіденційністю. Їх використання може завдати шкоди суспільству через збої та неналежне або злочинне використання. Відмічено значне збільшення кількості аварій за участю дронів або безпілотних літальних систем (БПЛА). Наприклад, неправильне використання поблизу аеропорту може становити серйозну загрозу громадській безпеці та викликати дискомфорт.

З цієї причини розробка технологій виявлення, ідентифікації та пом'якшення шкідливих дронів набула першочергового значення. Система контрзаходів, яку також називають системою протидії UAS, може ідентифікувати та нейтралізувати безпілотник-зловмисник, який класифікується як загроза.

Системи нейтралізації активуються системою командування та управління, щоб реагувати на загрозу, яку представляє виявлений зловмисний дрон. Декілька систем нейтралізації можуть бути активовані одночасно, щоб співпрацювати для підвищення ефективності нейтралізації. Крім того, ці системи можуть бути розташовані на одній або кількох різних платформах відповідно до фізичної архітектури системи протидії.

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						5
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Системи нейтралізації можуть виконувати такі дії: попередження, керування, переривання, відключення та знищення. Ці дії здійснюються за допомогою прийомів нейтралізації, простіше позначених як нейтралізатори (або пом'якшувачі). У літературі нейтралізатори класифікуються по-різному. Нейтралізатори можуть бути поділені на фізичні та нефізичні залежно від того, чи було фізичне пошкодження дрону. Більше того, у випадку з нефізичними нейтралізаторами немає контакту між нейтралізатором і дроном, але деякі з них насправді можуть завдати шкоди дрону. Подібний підрозділ також існує, навіть якщо деякі нейтралізатори потрапили в різні класи. Однак було зроблено підрозділ на електронні нейтралізатори, які засновані в основному на електромагнітних хвилях та не викликають прямих пошкоджень дрона (наприклад, глушіння), і кінетичні нейтралізатори, які перехоплюють дрон фізичними засобами (сітка), але останні також включають високопотужні лазери та мікрохвилі. Враховуючи, що кожне описане визначення викликає деяку двозначність, буде прийнята така класифікація:

- електронні нейтралізатори, засновані на використанні електромагнітних хвиль, здатних перервати (операції), вивести з ладу або навіть знищити (принаймні частково) безпілотник;
- кінетико-механічні нейтралізатори, засновані на застосуванні механічних засобів, які передбачають контакт нейтралізатора (або його частини) та шкідливого дрона.

1.1 Електронні нейтралізатори

Електронні нейтралізатори дозволяють миттєво діяти, можуть легко націлюватися на ціль і не піддаються впливу факторів навколишнього середовища (наприклад, вітру та сили тяжіння). Вони можуть бути реалізовані різними методами, такими як кібератаки, потужні електромагнітні засоби та лазери. Кібератаки включають прийоми глушіння та спуфінгу (spoofing), які становлять переважну більшість нейтралізаторів, що використовуються в контексті БПЛА, атак на основі протоколів (наприклад, отруєння кешу

					PT81.648342.001 ПЗ	<i>Лис</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		6

деаутифікації та протоколу розділення адрес (ARP) у випадку Wi-Fi мережі).

1.1.1 Радіочастотні перешкоди

Методи радіочастотного (РЧ) перешкоджання дозволяють користувачам порушувати, знижувати якість або переривати зв'язок між шкідливим дроном і відповідною станцією дистанційного керування. Вони складаються з генерування сигналу завад, щоб знизити SINR (відношення сигнал/перешкода плюс шум), що вводиться в приймач дрону, щоб ускладнити, або взагалі унеможливити, отримати надіслану інформацію за допомогою дистанційного керування. Очевидно, що також можна заглушити пульт дистанційного керування, щоб порушити будь-які дані зворотного зв'язку, надіслані дроном. Заклинений безпілотник може мати різні реакції залежно від його конструкції:

- він може здійснити посадку в поточному положенні;
- він може виконати процедуру повернення додому;
- він може впасти на землю без керування;
- може летіти у випадковому напрямку без контролю.

РЧ-перешкоди можуть застосовуватися до інших сигналів, крім пульта дистанційного керування. Наприклад, для глушіння відеоканалу, що використовується для функції перегляду від першої особи (FPV), що показує можливість відключення цієї функції та запобігання оператору маневрувати дроном за відсутності умов LOS. Перешкоди також можна використовувати для підвищення надійності бездротового зв'язку за наявності підслуховувача. Це випадок спільного глушіння, при якому ретрансляційний вузол передає сигнал глушіння в той же час, коли легітимне джерело передає своє повідомлення, щоб перешкодити будь-якому підслуховувачу. Змінюючи перспективу, завади також можна використовувати для збільшення ймовірності перехоплення зв'язку.

Існує кілька методів радіочастотних перешкод.

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						7
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Перший метод, шумове глушіння(*noise jamming*) — найпростіший у виконанні і полягає у застосуванні шумового сигналу до частини або до всієї спектральної смуги, зайнятої сигналом, який необхідно заглушити, щоб зменшити ємність каналу і збільшити кількість помилок в отриманих даних.

Другий метод — це глушіння тону(*tone jamming*): в цьому випадку для створення перешкод використовується один або кілька тонів (тобто вузькосмугових сигналів). Ефективність залежить від розташування тонів і потужності, що передається.

Третій метод — глушіння розгортки(*sweep jamming*), який полягає в передачі вузькосмугового сигналу, який змінює спектр частот, що цікавить, з часом. У кожен момент часу охоплюється лише частина спектру, але в певний період (кількість часу, необхідного для повної розгортки) зачіпається вся цікава смуга.

Четверта і остання техніка — це розумне глушіння(*smart jamming*), також відоме як глушіння з урахуванням протоколу. Він може бути застосований, коли характеристики цільового сигналу відомі апріорі. Наприклад, якщо система зв'язку під час перешкоджання використовує розширений спектр (FHSS) зі стрибковою зміною частоти і шаблон стрибкоподібних перепадів відомий, то нейтралізатор може виконувати ті самі стрибки частоти, що й ціль, і зменшувати смугу пропускання, необхідну для сигналу перешкоди. Аналогічно, якщо цільова система зв'язку використовує спектр з розширеним спектром прямої послідовності (DSSS), властивості поширення сигналу, що підлягає атаці, можна використовувати для передачі сигналу перешкод, що має високу кореляцію щодо вихідного, щоб збільшити бітову помилку швидкості зв'язку для нейтралізації. Таким чином, інтелектуальне глушіння є ефективним, оскільки воно відкалібровано точно на цільовий сигнал, який підлягає збуренню, і ефективним за потужністю, оскільки діє лише відповідно до цільового сигналу (за часом і частотою). У будь-якому випадку, якщо невідомі попередні знання системи зв'язку, яку необхідно нейтралізувати, необхідно провести аналіз відповідного сигналу, щоб визначити його характеристики та слабкі місця. Отже, технології SDR добре підходять для

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						8
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

реалізації інтелектуального глушіння; завдяки своїй гнучкості вони дозволяють як аналізувати цільовий сигнал, так і відтворювати спеціальний сигнал, який буде використовуватися як заважаючий сигнал .

1.1.2 Радіоподавлення GNSS

Заглушення GNSS (Глобальна навігаційна супутникова система) не відрізняється від радіочастотних перешкод, а просто відноситься до глушіння сигналів GNSS. Він розглядається окремо через його актуальність, враховуючи, що сигнали GNSS, як правило, найбільше піддаються нейтралізації. Сигнали, отримані від супутників, характеризуються низьким значенням потужності і, таким чином, вразливі до сигналів завад. Тому розглянута методика може бути ефективною. Насправді, заглушення GPS-приймача комерційного дрона може призвести до дрейфу та труднощів з керуванням, а також перешкоджати належній роботі процедури повернення додому (RTH).

Для реалізації перешкод GNSS можна використовувати ті самі радіочастотні методи, які проілюстровані в попередньому пункті. Ці методи були проаналізовані та оцінені стосовно сигналів GPS разом із послідовним заглушенням імпульсів, яке включає передачу послідовності імпульсів у часі з невеликим робочим циклом на центральну частоту, що цікавить, і може розглядатися як особливість здійснення шумоподавлення. Найкращі результати досягаються за допомогою розумного глушіння та глушіння розгортки — перший метод є найефективнішим у порівнянні зі своїм призначенням (зведення сигналу GPS до приймача непридатним), тоді як сила другого полягає в простоті реалізації, хоча він слід зазначити, що отримана ефективність залежить від швидкості, що використовується для розгортки смуги частот.

Зاغлушення GNSS може бути неефективним, якщо зловмисні дрони оснащені датчиками IMU. У цьому випадку, якщо дрон оснащений дистанційним керуванням, радіочастотне глушіння може бути некорисним. Аналогічно, глушіння GNSS є дуже важливим для дронів, не обладнаних

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						9
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

дистанційним керуванням (тобто радіочастотне перешкоджання не застосовується), які слідуєть за заздалегідь запрограмованим маршрутом за допомогою GNSS. Отже, внутрішні недоліки, виявлені радіочастотними та GNSS перешкодами, можуть бути компенсовані їх одночасним розгортанням з метою підвищення ефективності нейтралізації.

1.1.3 Спуфінг

Спуфінг(*spoofing*) полягає у створенні правдоподібного підробленого сигналу з достатньою силою, щоб обдурити приймач зловмисного дрона, щоб він повірив, що це законний сигнал. Сигнали під спуфінгом можуть бути пов'язані з деякими різними додатками або пристроями: комунікація дистанційного керування, передача даних корисного навантаження, GNSS, датчики. Щоб виконати спуфінг, необхідно знати використовувані стеки протоколів зв'язку (не тільки фізичний рівень), щоб їх можна було відтворити. Якщо стеки відомі, їх можна попередньо проаналізувати, інакше спочатку їх потрібно якимось чином визначити. Тому спуфінг є складним методом і не завжди вдалим. У будь-якому випадку, принаймні теоретично, за допомогою методів спуфінгу можна було б взяти під контроль зловмисний дрон і змусити його відійти від захищеної зони.

Як згадувалося вище, типовий клас сигналів, які часто беруть участь у спуфінгу, представлений сигналами GNSS. У цьому конкретному випадку можна змусити дрон приземлитися, включити автопілот, залишитися зависати або слідувати бажаним шляхом. Взагалі, існує дві різні стратегії: явний спуфінг і прихований спуфінг. У першому випадку спуфер (тобто нейтралізатор на основі спуфінгу) не приховує своєї спроби «підпорядкувати» цільову систему і, отже, не узгоджує підроблені сигнали з легітимними. Зокрема, після першої фази, коли він заклинює приймач GPS, щоб змусити його втратити блокування та знову отримати всі сигнали, він може взяти контроль, якщо підроблені сигнали мають потужність, яка задовольняє двом умовам: перевищення порогового значення приймача та примусово перейти до автентичних сигналів GPS нижче вищезгаданого порогу, використовуючи

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						10
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

функцію AGC (автоматичний регулятор підсилення) приймача. Експериментальні випробування показали, що коли відношення між потужністю підробленого сигналу (P_c) і законного сигналу (P_l) дорівнює 10 дБ, попередні умови задовольняються. Натомість, у разі прихованого спуфера, спуфер припускає, що приймач GPS і навігаційна система обладнані методами виявлення підробок, від яких необхідно уникати за допомогою відповідних підроблених сигналів.

Експериментально було перевірено, що, якщо спуфер може оцінити швидкість і положення цільового дрона з помилками під певними порогами (відповідно нижче 10 м/с і 50 м), то він може надійно та приховано взяти під контроль вузли відстеження комерційних приймачів з малим співвідношенням P_c до P_l (порядку одиниць дБ). Зауважимо, що прихований спуфінг можна узагальнити та застосувати до будь-якого типу зв'язку, особливо якщо передбачалося, що приймач шкідливого дрона оснащений технологією захисту від спуфінгу. У цих випадках підроблений сигнал має бути максимально пов'язаний із легітимним сигналом і з аналогічним співвідношенням рівня потужності з часом, щоб його можна було сплутати з легітимним.

Врешті, спуфінг, що застосовується до бортових датчиків, також заслуговує певної уваги. У цьому випадку джерело спуфінгу посилає помилкові сигнали на датчики, що може призвести до дестабілізації зловмисної системи управління дроном. Наприклад, гіроскопи та акселерометри чутливі до ультразвуку на своїй резонансній частоті, і ця вразливість може бути атакована. Однак ці атаки вимагають потужної динамічності і обмежені в діапазоні через погіршення звукової хвилі з відстанню.

1.1.4 Нейтралізатори, що використовують атаки на основі протоколу та атаки повторення

Деякі кібератаки намагаються використати вразливості, наявні в протоколах, що використовуються в комунікаційних мережах, для здійснення шкідливих дій. Ці атаки включають атаки відмови в обслуговуванні (DoS), які

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						11
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

полягають у відключенні машини (або мережі), що робить її недоступною для передбачуваних користувачів. Деаутентифікація Wi-Fi, яка полягає у відключенні користувача від відносної точки доступу (WAP), і *flooding*, яка полягає в відправленні великого обсягу трафіку до цілі, щоб вона не могла обробляти легітимні повідомлення, належать до вищезазначеного методу. Ці атаки також можуть бути спрямовані на дрони. Наприклад, деякі комерційні дрони, засновані на зв'язку Wi-Fi, які не вимагають аутентифікації для доступу до мережі, виявилися вразливими до деаутентифікації та переповненню по відношенню

до контролера мережевого інтерфейсу дрона (NIC). Зокрема, за допомогою деаутентифікації можна було від'єднати комерційний дрон від його дистанційного пілота, щоб активувати процедуру безпеки та скористатися перевагами вікна відключення, щоб взяти безпілотник під контроль.

Іншою кібератакою, яка використовується для від'єднання комерційного дрона від його контролера, є атака на отруєння кешу протоколу розділення адрес (ARP). Багато з цих атак можна запобігти за допомогою доступу до мережі з аутентифікацією, але основну ідею можна використати для реалізації нейтралізатора для використання такого роду атак. Іншими словами, як і у випадку спуфінгу, можна проаналізувати протоколи, які використовуються безпілотниками, щоб визначити деякі слабкі місця на одному або кількох рівнях стека зв'язку, які будуть використовуватися для виконання операцій нейтралізації. Звідси випливає, що такий нейтралізатор може бути застосовним і ефективним для комерційних дронів, протоколи яких відомі. Метод, безсумнівно, не є надійним рішенням, якщо користувачі можуть виправити використані вище недоліки, однак він може бути застосований як перший метод нейтралізації комерційних дронів, які використовуються неналежним чином, але без незаконних цілей.

Іншим прийомом, корисним для реалізації як нейтралізаторів, є атаки відтворення. Його можна віднести до сімейства атак на основі протоколів. Він заснований на перехопленні передачі даних і подальшій її повторній передачі з певною затримкою і може використовуватися для захоплення та

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						12
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

дезорієнтації дрона. Тому навіть такі види атак можна брати до уваги, але оскільки вони дуже прості, слід розглянути можливі контрзаходи, прийняті зловмисним дроном(ами).

Наприклад, є дослідження, яке показало механізм виявлення, застосований для повторних атак на основі аутентифікації пілота, який керує дроном вручну. Механізм використовує класифікатор, здатний розпізнавати характерний стиль керування пілотом, використовуючи дані бортових датчиків руху.

1.1.5 Потужні електромагніти та лазери

Високопотужні електромагнітні засоби можна використовувати для створення променів електромагнітної енергії в широкому спектрі частот, у вузько- або широкосмуговому режимі, викликаючи ряд тимчасових або постійних впливів на електроніку цільових дронів. Їх можна розділити на два класи: вузькосмугові електромагнітні (також відомі як високопотужні мікрохвилі, НРМ), які включають високу потужність на майже однотонній частоті, і широкосмугові електромагніти, які мають короткі імпульси у часовій області та енергію, розподілену по широкій смузі. НМР вимагає дуже високої потужності на одній частоті. Отже, визначення ефективної частоти, яка спричиняє збій у роботі дрона, є ключовим фактором.

Потужний електромагніт повинен бути спрямований точно на ціль, щоб бути ефективним, інакше летальність значно знижується, і деякі пристрої можуть продовжувати працювати після їх використання. Тому оцінка ефективності нейтралізації після пострілу також є проблемою.

Лазери, що використовуються як пом'якшувачі, здатні вивести з ладу або знищити дрон. Електролазер іонізує шлях до дрона і випромінює електричний струм по провідній доріжці іонізованої плазми. Лазери можна розділити на малопотужні та високопотужні:

- малопотужні можна використовувати для нейтралізації деяких чутливих датчиків дрона (наприклад, електрооптичних датчиків);

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						13
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

- потужні (працюють на мегават) можуть бути справжньою зброєю, здатною спалити частину дрона і знищити його.

Для обох категорій необхідне точне прицілювання, що передбачає достатній час для відстеження цілі. Слабкими сторонами лазерів є необхідність високої технологічної розробки для їх впровадження (для потужних лазерів), чутливість до погодних умов, точне наведення та час відстеження.

Як потужний електромагніт, так і потужні лазери є потужним заходом заборони, який зазвичай використовується у військових умовах.

У цивільному середовищі вони не можуть бути життєздатним варіантом, особливо в місцях скупчення людей, через ризик неконтрольованого падіння дрона або запуску розгортання небезпечних корисних вантажів. Вони також не придатні для аеропортів та прилеглої простору через побічну небезпеку для авіаційних операцій.

Отже, виходячи з обмеженої доступної на ринку інформації про потужні електромагнітні та потужні лазери, ми можемо легко зробити висновок, що вони завжди мають великі розміри та вагу та вимагають високого джерела живлення. Тому вони можуть бути в основному інтегровані в наземні платформи (як правило, вони встановлюються на гусеницях) і не підходять для низьковисотних платформ, таких як міні-дрони.

1.2 Кінетико-механічні нейтралізатори

Кінетико-механічні нейтралізатори здатні фізично блокувати або навіть знищувати безпілотники. Для ефективної нейтралізації необхідне наведення та/або відстеження шкідливих дронів; насправді ці нейтралізатори повинні діяти якомога ближче до безпілотника, який атакується. Коротко розглянемо різні типи наявних кінетико-механічних нейтралізаторів.

1.2.1 Нейтралізатори на основі снарядів

Ці нейтралізатори є справжньою зброєю з використанням снарядів, здатних знищувати дрони. До них належать кулемети, боеприпаси, керовані

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						14
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ракет, артилерія, міномети та ракети. Деякі з них (керовані ракети) можуть вимагати системи наведення та відстеження для відстеження та ураження цілі дрона, а інші можуть бути оснащені оптичним датчиком для виявлення та відстеження об'єктів. Вони є дорогим рішенням (вартість пострілу висока) і зазвичай використовуються у військових контекстах. Врешті-решт, вони також здатні викликати побічні ефекти, оскільки вражений дрон може впасти на землю, завдаючи шкоди людям та/або інфраструктурі.

1.2.2 Зіткнення БПЛА

У цьому випадку за зловмисним дроном слідує спеціальний БПЛА, оснащений можливостями виявлення та відстеження, щоб зіткнутися та знищити його. Дрон-нейтралізатор вимагає високої швидкості, щоб переслідувати шкідливий дрон, і, як правило, він ефективний для невеликих дронів, розташованих у захищених зонах. Безпілотники зіткнення можуть використовувати методи виявлення, засновані на техніках комп'ютерного зору, і можуть нести вибухові речовини, щоб максимізувати пошкодження під час зіткнення з дроном. Вони можуть завдати побічної шкоди, як і у випадку снарядів, і порівняно з останніми характеризуються більшою затримкою нейтралізації. На закінчення, ці нейтралізатори є одноразовими системами, які діють як гібридна система, щось між дроном і ракетою.

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						15
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2 МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРОБКИ ПЕРЕДАВАЧА ЗАВАД

2.1 Огляд методології розробки передавача завад

Розрахунок структурної схеми передавача проводиться від вихідного каскаду до збуджувача. Потужність в навантаженні R_n , параметри навантаження, діапазон робочих частот та рід роботи передавача є основними параметрами, які необхідно враховувати при розробці структурної схеми.

Радіопередавач може бути навантажений або безпосередньо на антену, або на вхідний опір АФП (антенно-фідерний пристрій) із стандартним значенням $R_{вхАФП} = 50 \text{ Ом}$. Фактично більшість передавачів під'єднуються до антени через АФП.

Рід роботи передавача визначається типом модуляції ВЧ коливань і зумовлює смугу частот радіосигналу одного каналу, міжканальну різницю частот, тобто крок сітки частот синтезатора частоти (СЧ), кількість каналів у відведеній смузі частот, та режим підсилення коливань, що виробляє збуджувач, у каскадах передавача.

Таким чином збуджувач виробляє високочастотні (ВЧ) коливання робочих частот із заданою стабільністю і в більшості випадків формує радіосигнал із заданим у технічному завданні (ТЗ) типом модуляції. Типові значення потужності коливань на виході збуджувача становлять 5...10 мВт.

Підсилення потужності цих коливань до заданого рівня у R_n відбувається у наступних каскадах передавача (включно з вихідним каскадом, що працює на $R_{вхАФП}$), які називаються генераторами із зовнішнім збудженням (ГЗЗ).

Основною схемою ГЗЗ є однотактна схема, до складу якої входить активний елемент (АЕ), джерело живлення (ДЖ), вихідне та вхідне кола узгодження (КУ), які здійснюють необхідну трансформацію відповідних опорів з метою забезпечення оптимального режиму роботи АЕ. Вхідне КУ доцільно відносити до попереднього каскаду підсилення, для якого це коло є вихідним.

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						16
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Енергетичним показником КУ є коефіцієнт корисної дії:

$$\eta_{\text{КУ}} = \frac{P_{\text{ВИХ}}}{P_{\text{ВХ}}}$$

значення якого залежить від типу КУ і лежить у межах 0,6...0,85. Більші значення характерні для каскадів більшої потужності.

Таким чином АЕ має забезпечити коливальну потужність $P_{\sim\Gamma}$ при потужності на виході ГЗЗ $P_{\sim\text{ВИХ}}$

$$P_{\sim\Gamma} = \frac{P_{\sim\text{ВИХ}}}{\eta_{\text{КУ}}}$$

Нелінійний режим – режим з відсіканням струму вихідного електроду АЕ- забезпечує значно кращі енергетичні показники особливо при роботі АЕ у граничному режимі, але він може бути застосований для сигналів із сталою амплітудою несучого колювання - сигналів з кутовою модуляцією (КМ) та її підвидами частотною модуляцією (ЧМ) або фазовою модуляцією (ФМ).

Лінійний режим у одноктактному ГЗЗ забезпечується підсиленням класу А, або двотактним ГЗЗ, кожне плече якого може працювати у граничному режимі, тобто з високою енергетикою.

АЕ (транзистор) для кожного ГЗЗ передавача вибирається за довідниковими експериментальними даними (P_{\sim}' , f'), заданими робочими частотами та установчою потужністю ГЗЗ $P_{\sim\Gamma}$. Недоцільно вибирати АЕ із значним перевищення P_{\sim}' над $P_{\sim\Gamma}$ та $f' \gg f_{\text{роб}}$. Такі умови сприяють уникненню можливого самозбудження ГЗЗ.

Як правило у довідниках можна знайти декілька типів АЕ, які задовольняють цій умові. В такому випадку необхідно оптимізувати свій вибір використовуючи інші експериментальні (рекомендовані) параметри – K'_p , $\eta'_{\text{АЕ}}$, $E'_{\text{ж}}$.

Критерієм оптимізації вибору АЕ для вихідного каскаду є порівняння K'_p транзисторів, але K'_p не може бути більше 20.

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						17
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Для проміжних каскадів доцільно вибрати АЕ з однаковою напругою живлення ($E'_{к.}$), що може спростити схему джерела живлення.

2.2 Визначення технічних вимог до розробки структурної схеми передавача

Враховуючи, що між навантаженням та вихідним каскадом знаходиться схема узгодження з коефіцієнтом корисної дії (ККД) $\eta_{cy} = 0,6 \dots 0,85$, потужність, яку повинен віддати вихідний каскад дорівнює

$$P_{вих} = \frac{P_{н}}{\eta_{cy}}$$

Вихідні каскади сучасних передавачів будуються за схемами додавання потужностей кількох окремих генераторів із зовнішнім збудженням. Тому вихідна потужність окремого ГЗЗ у вихідному каскаді розраховується за формулою

$$P_i = \frac{P_{вих}}{N \cdot \eta_{\Sigma}}$$

де N – кількість ГЗЗ, потужності яких додаються,

$\eta_{\Sigma} = 0,9$ - ККД суматора потужностей.

Визначивши вихідну потужність окремого ГЗЗ у вихідному каскаді вибирається активний елемент – транзистор – за довідковими експериментальними даними. При цьому визначається напруга джерела живлення E_k активних елементів вихідного каскаду та струм споживання окремого ГЗЗ та вихідного каскаду в цілому

$$I_{i_0} = \frac{P_i}{E_k \cdot \eta}$$

$$I_{вих_0} = N \cdot I_{i_0}$$

де η – ККД каскаду, який на етапі розробки структурної схеми доцільно приймати 0,5.

За експериментальними даними, приведеними в таблицях, визначається коефіцієнт передачі потужності транзистора K_p і розраховується необхідна вхідна потужність окремого ГЗЗ за формулою

					РТ81.648342.001 ПЗ	Лис
						18
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{вх_i} = \frac{P_i}{K_p}$$

Враховуючи коефіцієнт передачі вхідної схеми узгодження та ККД СУ $\eta_{cy} = 0,6 \dots 0,8$ та ККД подільника потужності $\eta_D = 0,8 \dots 0,9$ визначається потужність, яку необхідно подати на вхід вихідного каскаду

$$P_{вх} = \frac{P_{вх_i} \cdot N}{\eta_{cy} \cdot \eta_D}$$

Потім аналогічно з врахуванням коефіцієнтів передачі міжкаскадних схем узгодження вибираються транзистори попередніх каскадів, визначаються напруги живлення, струми споживання та вхідні потужності до значення

$$P_{вх} = 5 \dots 10 \text{ мВт, яку може забезпечити збуджувач.}$$

При виборі транзисторів для каскадів з рівними вихідної потужності у діапазоні $P_{вих} \leq 0,1 \dots 0,2 \text{ Вт}$ [8] необхідно враховувати, що активні елементи працюють в режимі А, рис. 3.1 і ККД при цьому становить $\eta = 0,2$. Приклад структурної схеми приведено на рис.2.2.1.

Для малопотужних транзисторів в довідниках приводяться значення максимально допустимої потужності розсіювання на колекторі $P_{кд}$. Встановимо зв'язок між $P_{кд}$ та потужністю високочастотного коливання на виході транзистора $P_{вих}$.

$$\eta = 0,2 = \frac{P_{вих}}{P_{вих} + P_{кд}},$$

$$0,2 \cdot P_{вих} + 0,2 \cdot P_{кд} = P_{вих},$$

$$0,8 \cdot P_{вих} = 0,2 \cdot P_{кд},$$

$$P_{вих} = \frac{P_{кд}}{4}.$$

					РТ81.648342.001 ПЗ	Лис
						19
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

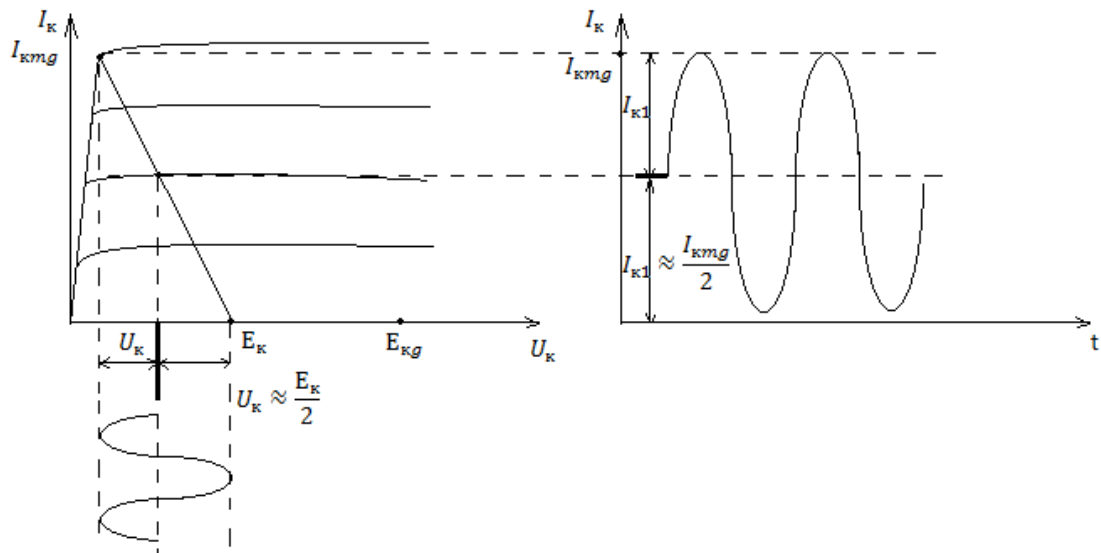


Рисунок 2.2.1 — Режим А роботи АЕ

З останнього виразу можна зробити висновок, що для транзистора, який працює в режимі А, потужність розсіювання на колекторі в чотири рази більша за потужність високочастотного коливання на виході транзистора.

Використовуються транзистори при знижених значеннях колекторної напруги E_k . Необхідно перевірити, яку потужність можна забезпечити на виході каскаду. Для цього використовуються максимально допустимі значення параметрів транзистора.

Приведемо приклад визначення $P_{вих}$, якщо транзистор працює в режимі А і відомі:

Максимально допустиме значення колекторної напруги $E_{кд}$

Максимально допустиме значення імпульсного струму колектора $I_{кнд}$

Максимально допустима потужність розсіювання на колекторі $P_{кд}$

Розрахунок коефіцієнта передачі потужності K_p малопотужних транзисторів покажемо на прикладі каскаду підсилення на транзисторі КТ312, вхідні характеристики, якого приведені на рис. 2.2.2

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

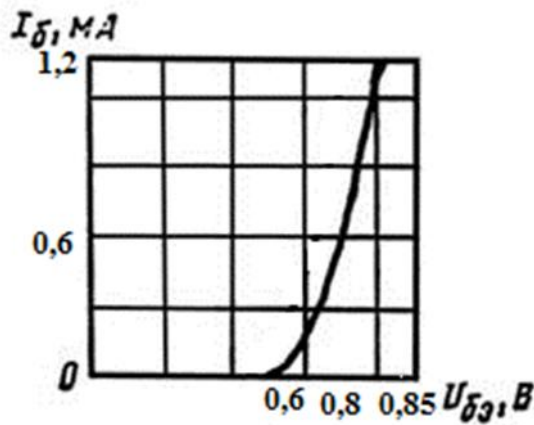


Рисунок 2.1.2 — вхідні характеристики транзистора КТ312

$$K_P = K_U \cdot K_I = K_U \cdot |\beta|,$$

$$K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{вих}} \cdot R_H}{U_{\text{вх}}} = \frac{S \cdot U_{\text{вх}} \cdot R_H}{U_{\text{вх}}} = S \cdot R_H.$$

де $S = \frac{\Delta I_{\text{вих}}}{\Delta U_{\text{вх}}}$ – крутизна прохідної характеристики, яку можна розрахувати за вхідними характеристиками та параметрами транзистора.

$$S = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{\text{ЕБ}}} = \frac{|\beta| \cdot \Delta I_B}{\Delta U_{\text{ЕБ}}} = \frac{5 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}}{0,05} = 60 \cdot 10^{-3} \text{ A/V}$$

де $|\beta| = 5$ – модуль коефіцієнта передачі струму колектора на високій частоті.

Тому

$$K_P = S \cdot R_H \cdot |\beta| = 60 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 5 = 15$$

де $R_H = 50 \text{ Ом}$ – вхідний опір наступного каскаду підсилення.

Представивши графічно роботу транзистора в режимі А можна визначити потужність $P_{\text{вих}}$.

$$P_{\text{вих}} < \frac{1}{2} I_{K1} \cdot U_K = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_{\text{ктд}}}{2} \cdot \frac{E_K}{2} = \frac{1}{8} I_{\text{ктд}} \cdot E_K$$

При цьому потрібно забезпечити режим роботи, при якому два параметри не можуть набувати максимально допустимих значень. Перевіряємо потужність розсіювання на колекторі

$$P_K = 4P_{\text{вих}} < P_{\text{ктд}}$$

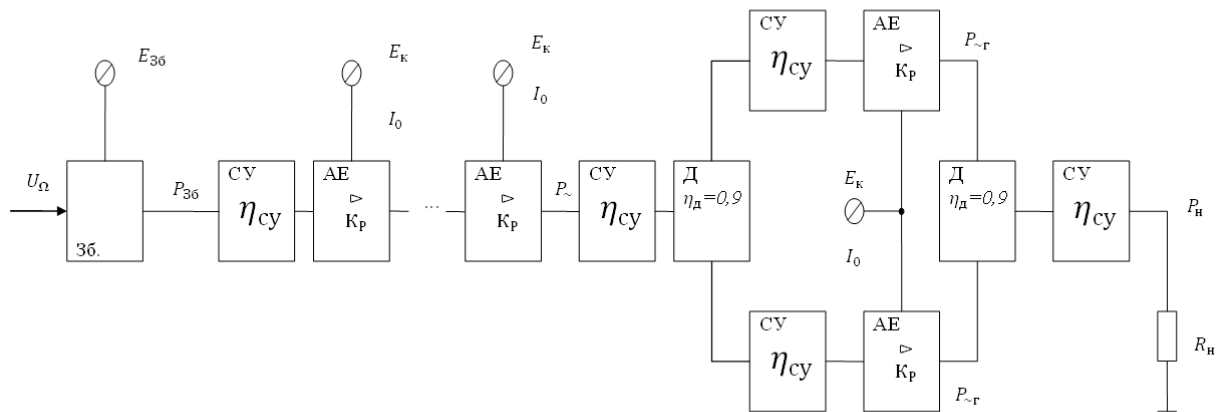


Рисунок 2.2.3 — Структурна схема РПП

2.3 Визначення технічних вимог до джерела живлення та розробка оптимального варіанту його структурної схеми

Структурна схема джерела живлення розроблена відповідно до використання передавача, зазначеного в технічному завданні. Передавач може бути стаціонарним, мобільним, несучим, носійні і від цього залежить тип джерела первинної електричної енергії, від якого необхідно отримати визначені при розробці структурної схеми величини напруг та струмів споживання всіх каскадів передавача. Основним джерелом живлення можуть бути мережі змінного струму напругою 220 В 50 Гц (однофазні, трифазні), морські та авіаційні бортові мережі 400 Гц постійного і змінного струму, автомобільні акумулятори 12 В і 24 В, маленькі акумулятори для радіопередавачів спец. призначення.

Структурні схеми джерел живлення можна будувати за класичною схемою від мережі змінного струму, а також за схемами з перетворенням частоти від мережі змінної або постійної напруги.

При цьому необхідно враховувати, що найбільш потужний вихідний каскад передавача живиться від окремого джерела напруги, а однакові напруги попередніх каскадів об'єднуються в одне джерело.

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						22
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Для живлення збуджувача, як правило, використовується малопотужне джерело стабільної напруги 4...5 В.

На структурній схемі необхідно вказати напругу кожного джерела та струм споживання. Для джерел живлення, що працюють від акумуляторних батарей, необхідно розрахувати струм споживання від первинного джерела напруги, а для носійних передавачів необхідно вибрати тип акумуляторної батареї з ємністю, яка забезпечить необхідний час роботи передавача. Приклад структурної схеми джерела живлення приведений на рис.2.3.1, де

Мф – мережевий фільтр; В – випрямляч; Ф – фільтр; І – інвертор; ЗЗ – коло зворотнього зв'язку; Ст – стабілізатор напруги

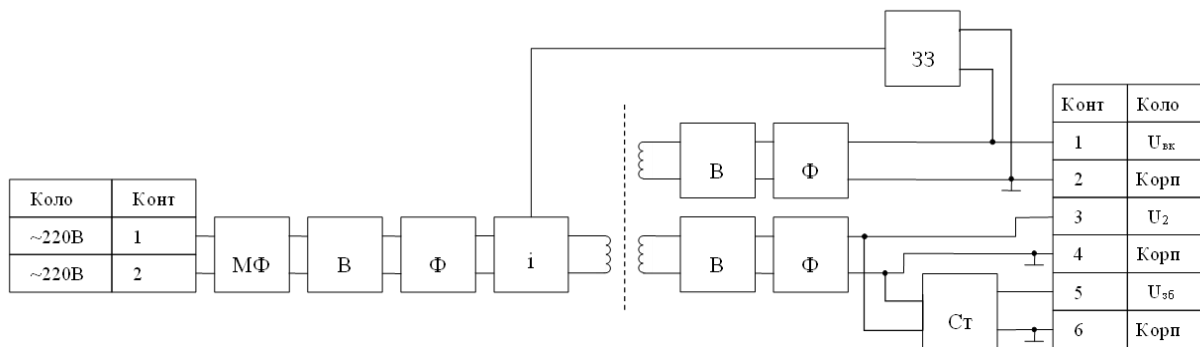


Рисунок 2.3.1 — Структурна схема джерела живлення

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PT81.648342.001 ПЗ

3 РОЗРАХУНОК ПЕРЕДАВАЧА ЗАВАД

3.1 Розробка структурної схеми з орієнтовним вибором активних елементів всіх каскадів

Основні вхідні данні для проектування:

Призначення передавача - носимий;

Потужність в навантаженні $P=20$ Вт;

Параметри навантаження $R = 50$ Ом;

Робочі частоти – середня частота $f = 900$ МГц;

Відносна нестабільність частоти – згідно з ДЕСТ;

Інші технічні вимоги відповідно до ДЕСТ;

Потужність у навантаженні має бути рівною $P_H = 20$ Вт на частоті $f=900$ МГц. Навантаження з вихідним каскадом має узгоджувати схема узгодження, ККД якої складає $\eta_{cy} = 0,7$. Отже, вихідна потужність має бути рівною:

$$P_{\text{вих}} = \frac{P_H}{\eta_{cy}} = \frac{20}{0,7} = 28,6 \text{ Вт}$$

У вихідному каскаді буде використовуватися мостова схема складання потужностей. Коефіцієнт корисної дії суматора потужностей складає $\eta_{\Sigma} = 0,9$. Розрахуємо вихідну потужність кожного каскаду підсилення:

$$P_i = \frac{P_{\text{вих}}}{2 \cdot \eta_{\Sigma}} = \frac{28,6}{2 \cdot 0,9} = 15,87 \text{ Вт}$$

На даному етапі потрібно вибрати два однакові активні елементи, які відповідають за своїми параметрами, тобто $P_{\text{вих АЕ}} = 15,87$ Вт.

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						24
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Для забезпечення необхідної потужності варто обрати активний елемент 2Т913В з наступними параметрами:

Транзистор	P_H'	K_p'	$E_{ж}'$	f'	η
2Т913В	> 10 Вт	2,3	28В	900 МГц	60 – 70%

Так як $K_p = 2,3$:

Потужність у кожному плечі складатиме на вході цього транзистора:

$$P_{вх.і} = \frac{P_i}{K_p} = \frac{15,87}{2,3} = 6,9 \text{ Вт}$$

Враховуючи коефіцієнт передачі вхідної схеми узгодження та ККД СУ $\eta_{су} = 0,6 \dots 0,8$ та ККД подільника потужності $\eta_{д} = 0,8 \dots 0,9$ визначається потужність, яку необхідно подати на вхід вихідного каскаду

$$P_{вх} = \frac{P_{вх.і} \cdot N}{\eta_{су} \cdot \eta_{д}} = \frac{6,9 \cdot 2}{0,7 \cdot 0,9} = 21,91 \text{ Вт}$$

Розрахуємо струм споживання окремого ГЗЗ та вихідного каскаду в цілому, де η – ККД каскаду, приймаємо 0,65.

$$I_{i_1} = \frac{P_i}{E_{ж} \cdot \eta} = \frac{15,87}{28 \cdot 0,65} = 872 \text{ мА}$$

$$I_{вих_1} = N \cdot I_{i_1} = 2 \cdot 0,872 = 1,74 \text{ А}$$

Розрахуємо $P_{вих2}$:

$$P_{вих2} = \frac{P_{вх}}{\eta_{су}} = \frac{21,91}{0,7} = 31,3 \text{ В.}$$

Між цими двома транзисторами розміщено ще такі активні елементи зі схемами узгодження:

2Т916А(1 шт.), 2Т913В(2 шт.), 2Т913Б(1 шт.), 2Т913А(1 шт.),
 КТ913А(1 шт), КТ911А(1 шт.), КТ911В(1 шт.), КТ918Б(1 шт.),
 КТ918А(1 шт.), 2Т368А(1 шт.).

Вони необхідні для підсилення сигналу від збуджувача до вихідного каскаду.

Для скорочення обсягу проекту, ми пропустили однотипні операції та виділили тільки необхідні для подальших розрахунків параметри.

					РТ81.648342.001 ПЗ	Лис
						25
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Оберемо активний елемент 2Т368А з наступними параметрами:

Транзистор	P_H'	K_p'	$E_{ж}'$	f'	η
2Т368А	225 мВт	3,3	20В	900 МГц	50%

$$P_{вх14} = \frac{P_{вих14}}{K_p} = \frac{0,023}{3,3} = 7 \text{ мВт}$$

Розрахуємо потужність яка буде подаватися з генератору збуджень:

$$P_{зб} = \frac{P_{вх14}}{\eta_{су}} = \frac{0,007}{0,7} = 10 \text{ мВт}$$

Розрахуємо струм споживання:

$$I_{13} = \frac{P_{вих13}}{E_{ж} \cdot \eta} = \frac{0,023}{20 \cdot 0,5} = 2 \text{ мА}$$

Отже вихідна потужність буде дорівнювати 2,3 мВт, саме таку потужність може забезпечити збуджувач.

$$I_{зб} = \frac{P_{зб}}{E_{ж} \cdot \eta} = \frac{0,01}{5 \cdot 0,2} = 10 \text{ мА}$$

Структурна схема передавача зображена в Додатку Б

					РТ81.648342.001 ПЗ	Лис
						26
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Розробка технічних вимог до передавача та створення структурних схем джерел живлення

Генератор з зовнішнім збудженням та активні елементи у схемі передавача будуть живитися напругою 48 В. Для живлення активних елементів необхідно 28 В постійної напруги, а для збуджувача 5В.

$P_1 = 15,87$ Вт	$E_1 = 28$ В
$P_2 = 31,3$ Вт	$E_2 = 28$ В
$P_3 = 19,44$ Вт	$E_3 = 28$ В
$P_4 = 12,08$ Вт	$E_4 = 28$ В
$P_5 = 7,5$ Вт	$E_5 = 28$ В
$P_6 = 4,66$ Вт	$E_6 = 28$ В
$P_7 = 2,89$ Вт	$E_7 = 28$ В
$P_8 = 1,65$ Вт	$E_8 = 28$ В
$P_9 = 0,945$ Вт	$E_9 = 20$ В
$P_{10} = 0,378$ Вт	$E_{10} = 20$ В
$P_{11} = 0,216$ Вт	$E_{11} = 20$ В
$P_{12} = 53$ мВт	$E_{12} = 20$ В
$P_{13} = 23$ мВт	$E_{13} = 20$ В
$P_{36} = 10$ мВт	$E_{36} = 5$ В

Запишемо струми, які будуть споживатися активними елементами та генератором із зовнішнім збудженням, які були розраховані вище.

$$I_1 = 872 \text{ мА}$$

$$I_{01} = 2,24 \text{ А}$$

$$I_{02} = 1,07 \text{ А}$$

$$I_{03} = 663 \text{ мА}$$

$$I_{04} = 487 \text{ мА}$$

$$I_{05} = 302 \text{ мА}$$

$$I_{06} = 230 \text{ мА}$$

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PT81.648342.001 ПЗ

Лис

27

$$I_{07} = 79 \text{ мА}$$

$$I_{08} = 67 \text{ мА}$$

$$I_{09} = 38 \text{ мА}$$

$$I_{10} = 22 \text{ мА}$$

$$I_{11} = 12 \text{ мА}$$

$$I_{12} = 5 \text{ мА}$$

$$I_{13} = 2 \text{ мА}$$

$$I_{36} = 10 \text{ мА}$$

Розрахуємо потужності які віддає джерело кожному активному елементу передавача:

$$P_{дж1} = E_{ж1} \cdot I_1 \cdot 2 = 28 \cdot 0,872 \cdot 2 = 48,89 \text{ Вт}$$

$$P_{дж2} = E_{ж2} \cdot I_{01} = 28 \cdot 2,24 = 62,72 \text{ Вт}$$

$$P_{дж3} = E_{ж3} \cdot I_{02} = 28 \cdot 1,07 = 29,96 \text{ Вт}$$

$$P_{дж4} = E_{ж4} \cdot I_{03} = 28 \cdot 0,663 = 18,56 \text{ Вт}$$

$$P_{дж5} = E_{ж5} \cdot I_{04} = 28 \cdot 0,487 = 13,64 \text{ Вт}$$

$$P_{дж6} = E_{ж6} \cdot I_{05} = 28 \cdot 0,302 = 8,46 \text{ Вт}$$

$$P_{дж7} = E_{ж7} \cdot I_{06} = 28 \cdot 0,230 = 6,44 \text{ Вт}$$

$$P_{дж8} = E_{ж8} \cdot I_{07} = 28 \cdot 0,079 = 2,12 \text{ Вт}$$

$$P_{дж9} = E_{ж9} \cdot I_{08} = 20 \cdot 0,067 = 1,88 \text{ Вт}$$

$$P_{дж10} = E_{ж10} \cdot I_{09} = 20 \cdot 0,038 = 1,06 \text{ Вт}$$

$$P_{дж11} = E_{ж11} \cdot I_{10} = 20 \cdot 0,022 = 616 \text{ мВт}$$

$$P_{дж12} = E_{ж12} \cdot I_{11} = 20 \cdot 0,012 = 339 \text{ мВт}$$

$$P_{дж13} = E_{ж13} \cdot I_{12} = 20 \cdot 0,005 = 140 \text{ мВт}$$

$$P_{дж14} = E_{ж14} \cdot I_{13} = 20 \cdot 0,002 = 56 \text{ мВт}$$

$$P_{дж36} = E_{ж36} \cdot I_{36} = 5 \cdot 0,01 = 50 \text{ мВт}$$

Розрахуємо сумарну потужність яку віддає джерело живлення активним елементам:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma} &= 2 * P_{дж1} + P_{дж2} + P_{дж3} + P_{дж4} + P_{дж5} + P_{дж6} + P_{дж7} + P_{дж8} + P_{дж9} \\ &+ P_{дж10} + P_{дж12} + P_{дж13} + P_{дж14} + P_{дж36} \\ &= 2 * 48,89 + 62,72 + 29,96 + 18,56 + 13,64 + 8,46 + 6,44 \\ &+ 2,12 + 1,88 + 1,06 + 0,616 + 0,339 + 0,140 + 0,056 \\ &+ 0,05 = 243,82 \text{ Вт} \end{aligned}$$

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						28
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Розрахунок окремих вузлів передавача завод

3.3.1 Розрахунок кола колектора

В основному в ГЗЗ на біполярних транзисторах АЕ вмикаються за схемою зі спільним емітером (СЕ) або спільною базою (СБ). Один із варіантів побудови ГЗЗ з вхідним та вихідним колами узгодження та колами зміщення приведені на рис. 3.3.1.1.

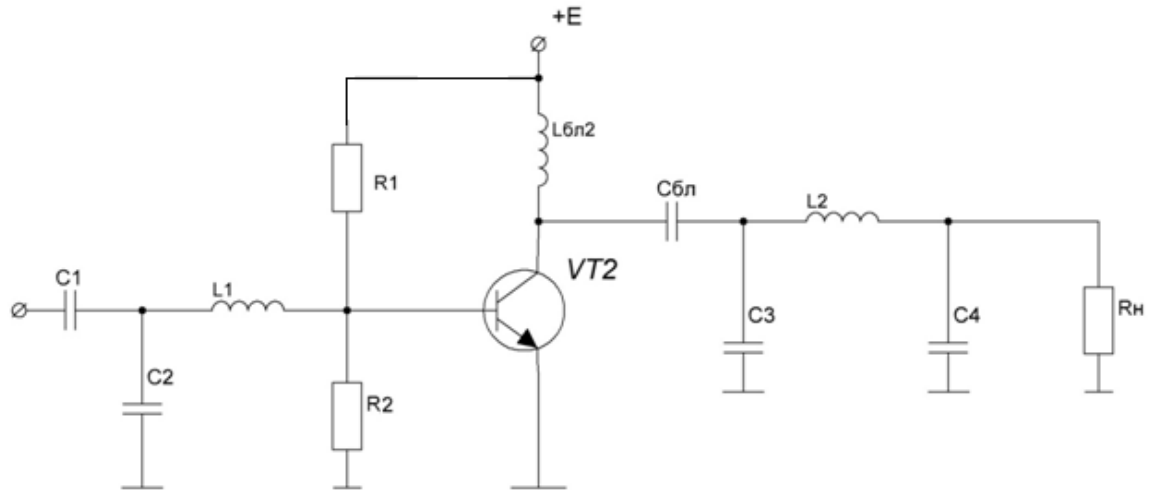


Рис. 3.3.1.1 – Схема побудови ГЗЗ

В цій схемі елементи C_1 , C_2 , L_1 , утворюють вхідне КУ, C_3 , L_2 , C_4 , - вихідне КУ, а подільник напруги R_1 , R_2 утворює коло зміщення.

Під час розробки структурної схеми були вибрані транзистори вихідного каскаду 2Т913В, тому необхідні дані для розрахунку вихідного каскаду зводимо у таблицю 3.3.1.1:

Таблиця 3.3.1.1 — Дані транзистора вихідного каскаду

Експериментальні параметри	Параметр и ідеалізованих статичних характеристик	Високочастотні параметри	Допустимі параметри
$f' = 900 \text{ МГц}$ $P' = 20 \text{ Вт}$ $K_p' = 2,3$ $\eta' = 65$	$\beta_0 (h_{21e}) = 12$ $r_{НАС} = 1,3$ $r_{\delta} = 0,05$ $r_e = 0$	$C_K = 10 \text{ пФ}$ $C_E = 80 \text{ пФ}$ $L_E = 0,25 \text{ нГн}$ $L_B = 2,5 \text{ нГн}$ $L_K = 1,95$ $f_T = 1200 \text{ МГц}$ $\tau_K = 10$	$E_{КО.ДОП} = 28 \text{ В}$ $E_{БЕ.ДОП} = 3,5 \text{ В}$ $E_{КЕ.ДОП} = 55 \text{ В}$ $I_{КО.ДОП} = 1 \text{ А}$

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

РТ81.648342.001 ПЗ

Лис

29

			$P_{\text{кдоп}} = 10$ Вт
--	--	--	------------------------------

Враховуючи, що транзистори у вихідному каскаді працюють в граничному режимі з відсіканням струму вихідного електроду в режимі В, то при цьому:

$$\theta = 90^\circ; \alpha_0 = 0,32; \alpha_1 = 0,5; \alpha_2 = 0,21.$$

1. Визначається $\xi_{\text{ГР}}$ – коефіцієнт використання колекторної напруги - відношення амплітуди високочастотного коливання до напруги живлення:

$$\xi_{\text{зр}} = 0,5 + \sqrt{0,25 - \frac{2P_{\sim} \cdot r_{\text{нас}}}{\alpha_1 \cdot E_K^2}} = 0,880$$

2. Амплітуда високочастотного коливання напруги на колекторі:

$$U_K = E_K \cdot \xi_{\text{зр}} = 24,64 \text{ В}$$

3. Максимальна напруга на колекторі:

$$U_{\text{км}} = E_K + U_K = 52,64 \text{ В} < E_{\text{КЕ.доп}} = 55 \text{ В}$$

4. Амплітуда першої гармоніки струму колектора:

$$I_{\text{к1}} = \frac{2P_{\sim}}{U_K} = 1,19 \text{ А}$$

5. Максимальне значення струму колектора:

$$I_{\text{км}} = \frac{I_{\text{к1}}}{\alpha_1} = 2,38 \text{ А}$$

6. Постійна складова струму колектора:

$$I_{\text{к0}} = I_{\text{км}} \cdot \alpha_0 = 0,76 \text{ А} < I_{\text{к0доп}} = 1 \text{ А}$$

7. Потужність джерела живлення:

$$P_0 = E_K \cdot I_{\text{к0}} = 21,37 \text{ Вт}$$

8. Потужність, що виділяється на колекторі:

$$P_K = P_0 - P_{\sim} = 5,47 \text{ Вт} < P_{\text{кдоп}} = 10 \text{ Вт}$$

9. ККД:

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						30
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\eta = \frac{P_{\sim}}{P_0} = 0,744$$

10. Розраховується опір навантаження, який забезпечить граничний режим роботи транзистора

$$R_{н.зр} = \frac{U_k}{I_{k1}} = 20,76 \text{ Ом}$$

3.3.2 Розрахунок кола бази

Розрахунок кола бази проводиться за наступним алгоритмом :

1. Розрахунок струму бази - I_B ;
2. Розрахунок вхідного опору - $Z_{вх}$;
3. Розрахунок вхідної потужності - $P_{вх}$;

Еквівалентна схема вхідного кола приведена на Рис. 3.3.2.1:

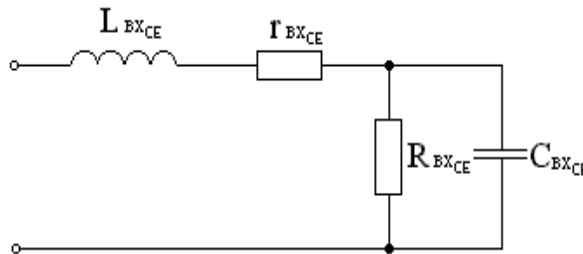


Рис. 3.3.2.1 – Еквівалентна схема вхідного кола

1. Розраховується додатковий опір, увімкнений між базою і емітером:

$$R_{\delta} = \frac{\beta_0}{2\pi f_T \cdot C_E} = 19,9 \text{ Ом}$$

Після розрахунку $r_{вх}$ перевірити умову $R_{\delta} \gg r_{вх}$, для зменшення втрат потужності, збудження на R_{δ} .

2. Амплітуда струму бази:

$$I_B = X \cdot \frac{\frac{I_{k1}}{\alpha_1}}{\frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\beta_0 f}{f_T}\right)^2}}} = X \cdot \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\beta_0 f}{f_T}\right)^2}}{\beta_0 \alpha_1} \cdot I_{k1} = 2,3 \text{ А}$$

$$X = \sqrt{A^2 + B^2} = 1,28$$

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						31
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

$$A = 1 - 2\pi f C_K R_{н.зр} \beta_0 \alpha_1 \cdot \frac{Y}{1+Y^2} = 0,227$$

$$B = 2\pi f C_K R_{н.зр} \left[1 + \beta_0 \cdot \frac{\alpha_1}{(1+Y^2)} \right] = 1,26$$

$$Y = \frac{\beta_0 f}{f_T} = 9$$

3. Максимальна зворотня напруга на емітерному переході:

$$|U_{BEmax}| = \left| -I_B \frac{R_\partial}{\sqrt{1+Y^2}} + E_{відс} \right| = 3,052V < E_{BE.доп} = 3.5 V$$

4. Постійні складові I_{B0} та I_{E0} :

$$I_{B0} = \frac{I_{к0}}{\beta_0} = 0,063 A$$

$$I_{E0} = I_{к0} + I_{B0} = 0,823 A$$

5. Розраховуються величини елементів еквівалентної схеми:

$$L_{BXCE} = L_\partial + \frac{L_E}{X} = 2,67 \text{ нГн}$$

$$r_{BXCE} = \frac{1}{X} \left[(1 + \alpha_1 \cdot 2\pi f_m C_{ка} \cdot R_{н.зр}) r_\partial + r_E + \alpha_1 2\pi f_m L_E \right] = 1,012 \text{ Ом}$$

$$R_{BXCE} = \frac{1}{X} [r_\partial + (1 + \alpha_1 \cdot \beta_0) r_e] - r_{BXCE} + R_\partial (1 - \alpha_1) = 8,98 \text{ Ом}$$

де R_{BXCE} – може набувати від'ємних значень.

6. Розраховуються значення елементів приведеної схеми вхідного кола транзистора (рис. 3.3.2.2)

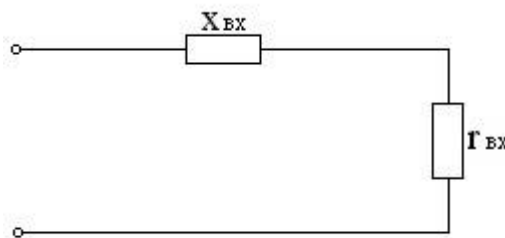


Рис. 3.3.2.2 – Схема вхідного кола транзистора

$$Z_{Bx} = r_{Bx} + jx_{Bx} = 1,12 + 14.1j$$

$$r_{Bx} = r_{BXCE} + \frac{R_{BXCE}}{1+Y^2} = 1,12 \text{ Ом}$$

$$x_{Bx} = 2\pi f L_{BXCE} - \frac{R_{BXCE} \cdot \frac{\beta_0 f}{f_m}}{1+Y^2} = 14,11 \text{ Ом}$$

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PT81.648342.001 ПЗ

Лис

32

7. Визначається потужність, що розсіюється на r_{BX} :

$$P_{BX} = 0.5I_0^2 \cdot r_{BX} = 2.96 \text{ Вт}$$

8. Визначається потужність розсіювання на опорі R_θ :

$$P_{R_\theta} = \frac{(U_{BE_{max}} + E_{\text{відс}})^2}{2R_\theta} = 0,641 \text{ Вт}$$

9. Розраховується коефіцієнт передачі потужності транзистора:

$$K_P = \frac{P_n}{P_{BX} + P_{R_\theta}} = 5,56$$

10. Повна потужність, що розсіюється в транзисторі:

$$P_{mp} = P_{BX} + P_K = 8,43 \text{ Вт} < P_{K.\text{доп}} = 10 \text{ Вт}$$

Розрахунок кола бази закінчується розрахунком кола зміщення переходу база-емітер АЕ, схема якого приведена на рис.3.2.3

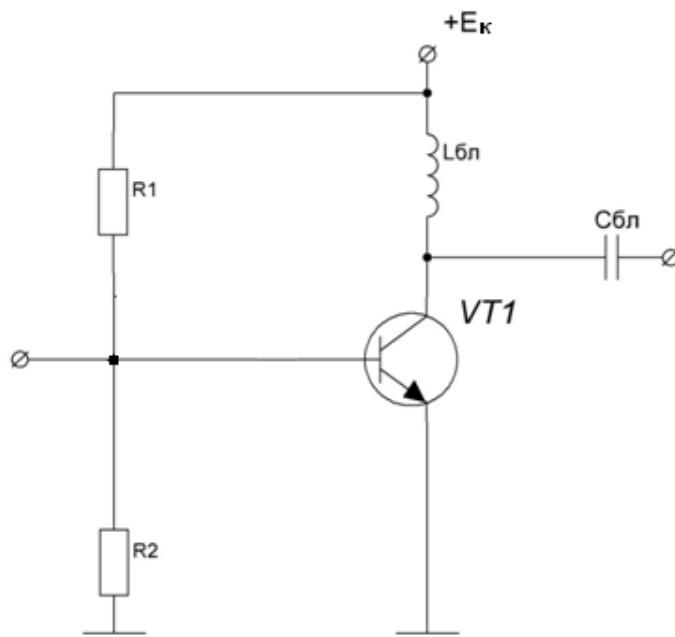


Рис.3.3.2.3 – Коло зміщення переходу база-емітер АЕ

Величини опорів R_1 і R_2 для класу В вибираються із умови:

$$\frac{E_k \cdot R_2}{R_1 + R_2} = E_{\text{відс}}$$

$$\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = R_\theta$$

$$R_1 = 276,38 \text{ Ом} = 300 \text{ Ом}$$

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PT81.648342.001 ПЗ

Лис

33

$$R_2 = 21,45 \text{ Ом} = 20 \text{ Ом}$$

При цьому необхідно перевірити, щоб потужність розсіювання на резисторах кола зміщення не перевищувала значення $(0,05 \dots 0,15)P_{\sim\Gamma}$

$$P_{зм} = \frac{E_K^2}{R_1 + R_2} = 0,245 \text{ Вт} < (0,05 \dots 0,15)P_{\sim\Gamma} = 1,587 \text{ Вт}$$

Величини блокувальних дроселів та конденсаторів вибираються із наступних умов:

$$X_{L_{\text{бл}}} = 2\pi f L_{\text{бл}} > 35 \cdot R_{н.гр} = 43,4 \text{ Ом}$$

$$X_{C_{\text{бл}}} = \frac{1}{2\pi f C_{\text{бл}}} < \frac{R_{н.гр}}{35} = 0,035 \text{ Ом}$$

$$L_{\text{бл}} = 150 \text{ нГн}$$

$$C_{\text{бл}} = 57,5 \text{ нФ} = 60 \text{ нФ}$$

3.3.3 Розробка схем додавання та ділення потужностей

Визначивши вхідний опір $r_{\text{вх}}$ та опір навантаження, що забезпечує граничний режим роботи транзистора окремого ГЗЗ вихідного каскаду $R_{н.гр}$, переходять до розробки схем додавання та ділення потужностей, згідно завдання, обирається резонансна синфазна мостова схема

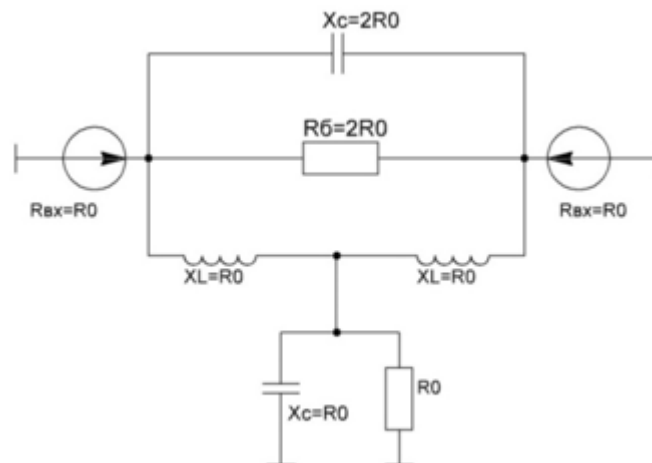


Рисунок 3.3.3.1 — Резонансна синфазна мостова схема

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PT81.648342.001 ПЗ

Лис
34

Розрахунок схеми додавання потужності

1. Розрахуємо опір $R_0 = R_{н.зр}$, з розрахунків $R_{н.зр} = 20.76 \text{ Ом}$.

$$R_0 = 20.76 \text{ Ом}$$

2. Знайдемо значення індуктивності, якщо $X_L = R_0$ (робоча частота 900 МГц)

$$L = \frac{R_0}{2 \cdot \pi \cdot f} = 3.67 \text{ нГн}$$

3. Розрахуємо значення балансного резистора.

$$R_{бл} = 2 \cdot R_0 = 2 \cdot 20.76 = 41.52 \text{ Ом}$$

4. Знайдемо значення ємності, якщо $X_C = 2 \cdot R_0$.

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 2 \cdot R_0} = 2.13 \text{ пФ}$$

Розрахунок схеми ділення потужності

1. Будемо вважати опір $R_0 = R_n$

$$R_0 = 50 \text{ Ом}$$

2. Знайдемо значення індуктивності, якщо $X_L = R_0$

$$L = \frac{R_0}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{50}{2 \cdot \pi \cdot 80 \cdot 10^6} = 8.84 \text{ нГн}$$

3. Розрахуємо значення балансного резистора.

$$R_{бл} = 2 \cdot R_0 = 2 \cdot 50 = 100 \text{ Ом}$$

4. Знайдемо значення ємності, якщо $X_C = 2 \cdot R_0$.

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 2 \cdot R_0} = 0.88 \text{ пФ}$$

3.3.4 Розрахунок вузькосмугових вихідних схем узгодження на LC - елементах

1. Вихідні каскади працюють в режимі В з відсіканням струму вихідного електрода. При цьому $\theta = 90^\circ$, а коефіцієнти розкладання косинусоїдального імпульса дорівнюють:

$$\alpha_0 = 0.32; \alpha_1 = 0.5; \alpha_2 = 0.212; \alpha_3 = 0.$$

2. У зв'язку з цим розрахунок проводиться для другої гармоніки.

3. Вибирається тип схеми узгодження: «П» - тип або «Т» - тип.

4. Розраховується допустима потужність струму II гармоніки в навантаженні:

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						35
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{H2\partial on} = P_H \cdot 10^{\frac{a_{\partial on}}{10}} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$$

5. Розраховується допустима амплітуда струму II гармоніки в навантаженні:

$$I_{H2\partial on} = \sqrt{\frac{2P_{H2\partial on}}{R_H}} = 4,47 \text{ мА}$$

6. Визначається амплітуда струму II гармоніки на вході СУ:

$$I_{K2} = \frac{I_{K1}}{\alpha_1} \cdot \alpha_2 = 3,722 \text{ А}$$

7. Розраховується необхідний коефіцієнт фільтрації:

$$\Phi_{необх}^2 = \frac{I_{K2}^2}{I_{H2\partial on}^2} = 6,9 \cdot 10^5$$

в дБ - $a_\phi = 10 \lg \Phi_{необх}^2 = 58,39$

8. Визначається необхідна кількість елементів СУ для забезпечення розрахованого коефіцієнта фільтрації:

$$m \approx (0.05 \dots 0.1) a_\phi = 0,085 \cdot 67,9 = 4,96 \approx 5$$

9. Розрахунок проводиться для СУ «П» - типу $m = 5$, схема якої приведена на рис. 3.3.4.1

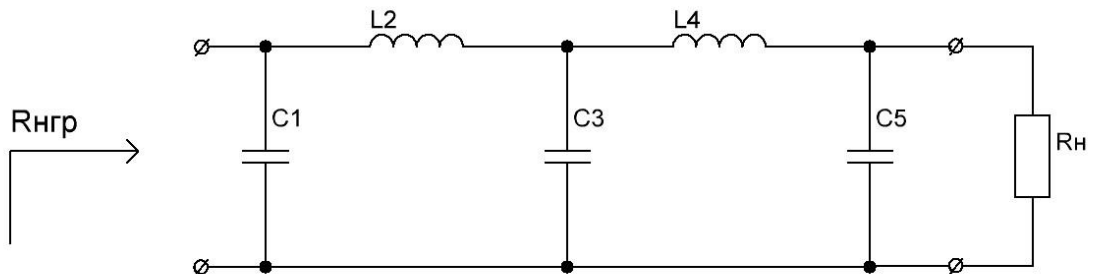


Рис. 3.3.4.1– Схема узгодження П – типу
Для цього схема рис. 3.3.4.1 розбивається на елементарні ланки, рис. 3.3.4.2

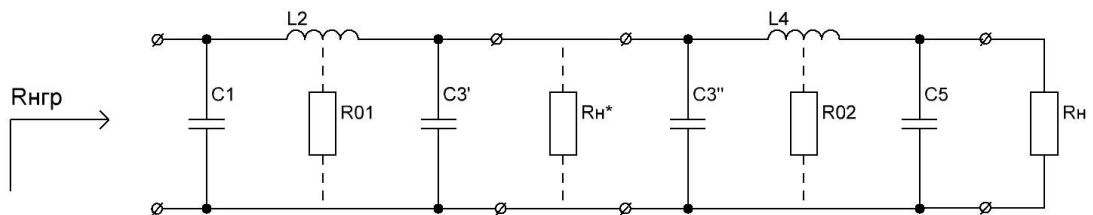


Рис. 3.3.4.2– Елементарні ланки схеми узгодження П – типу

$$R_H^* = \sqrt{R_{Hep} \cdot R_H} = 8,63 \text{ Ом}$$

$$R_{01} = \frac{R_{min}}{3 \dots 8} = 1,24/6 = 0,206 \text{ Ом}$$

$$R_{02} = \frac{R_{min}}{3 \dots 8} = 8,63/6 = 1,44 \text{ Ом}$$

10. Розрахунок величин x_{c1} , x_{L2} , x'_{c3} , x''_{c3} , x_{L4} , x_{c5} проводиться за методикою, враховуючи, що:

$$X_{c5} = 8,61 \text{ Ом}$$

$$X_{L4} = 11,58 \text{ Ом}$$

$$X'_{c3} = 1,35 \text{ Ом}$$

$$X''_{c3} = 3,862 \text{ Ом}$$

$$X_{L2} = 1,79 \text{ Ом}$$

$$X_{c1} = 0,55 \text{ Ом}$$

$$x_{c3} = \frac{x'_{c3} \cdot x''_{c3}}{x'_{c3} + x''_{c3}} = 1 \text{ Ом}$$

11. Розраховується дійсний коефіцієнт фільтрації СУ:

$$\Phi_g^2 = \left[n^5 \frac{(x_{L2} - \frac{x_{c1}}{n^2})(x_{L4} - \frac{x_{c3}}{n^2})}{x_{c1} \cdot x_{c3} \cdot x_{c5}} - n^3 \left\{ \frac{x_{L2} - \frac{x_{c1}}{n^2}}{x_{c1} \cdot x_{c3}} + \frac{x_{L4}}{x_{c1} \cdot x_{c5}} \right\} + \frac{n}{x_{c1}} \right]^2 \cdot R_H^2 +$$

$$\left[-n^4 \frac{(x_{L2} - \frac{x_{c1}}{n^2})(x_{L4} - \frac{x_{c3}}{n^2})}{x_{c1} x_{c3}} + n^2 \frac{x_{L4}}{x_{c3}} \right]^2 = 2,58 \cdot 10^6$$

де $n = 2$ – номер гармоніки

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						37
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

12.Перевіряється умова:

$$\Phi_g^2 \geq \Phi_{необх}^2$$

Умова виконується.

13.Якщо $\Phi_g^2 < \Phi_{необх}^2$, необхідно збільшити кількість елементів СУ, а при $\Phi_g^2 \gg \Phi_{необх}^2$ кількість елементів схеми зменшують і проводять перерахунок Φ_g^2 . При цьому в формулі при вилученні ємності підставляють $x_{ci} = \infty$, а при вилученні індуктивності підставляють $x_{Li} = 0$.

14.Розраховуються величини елементів схеми:

$$C_i = \frac{1}{2\pi f x_{ci}}; \quad L_i = \frac{x_{Li}}{2\pi f}$$

$$C_1 = 3,62 \text{ нФ}$$

$$C_3 = 1,99 \text{ нФ}$$

$$C_5 = 231 \text{ пФ}$$

$$L_2 = 3,56 \text{ нГн}$$

$$L_4 = 23 \text{ нГн}$$

15.Визначається ККД СУ:

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 = 0,91 \cdot 0,92 = 0,84$$

16.де η_1, η_2 - ККД елементарних ланок

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{x_{Li}}{R_{oi}Q_L}}$$

Величина розрахункового ККД повинна перевищувати значення, враховані при розрахунку структурної схеми передавача.

					РТ81.648342.001 ПЗ	Лис
						38
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4 Висновки за розрахунками

Отже, для розрахунку передавача завад засобам навігації БПЛА, що працюють на частотах навігаційних систем ГЛОНАСС, GSM, GPS, ми будемо використовувати метод, який описаний в цьому розділі. Для прикладу ми розрахували передавач, який працює на частоті навігаційної системи GSM(900МГц).

					<i>РТ81.648342.001 ПЗ</i>	Лис
						39
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

4 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ПІДСИЛЮВАЧА ІМПУЛЬСІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ РОБОТИ РЕМ

Даний розділ передбачає проектування та конструювання друкованої плати (ДП) підсилювача імпульсів синхронізації РЕМ. Уся робота по конструюванню проводилась у середовищі AD (Altium Design 20) та SOLIDWORKS 2021

4.1 Опис схеми

Схема виконана на ІМС компараторі LM211. Незвичайність схеми - у підході формування опорної напруги та вибір полярності вихідного імпульсу. Складність дільника для задавання порогу спрацьовування викликана немінучими відхиленнями номіналів елементів дільника, необхідністю хорошої фільтрації опорної напруги, компенсації напруги зміщення вхідної напруги (для LM211D може досягати 3 мВ, а для більш дешевої ІМС LM311D - 7 мВ). Крім того, неможливо гарантувати точну відповідність напруги живлення п'яти вольтам. Таким чином, видно, що без підстроювання порогу спрацьовування обійтися не можна.

Простим дільником зручність і, головне, точність регулювання для таких низьких напруг як 20 мВ, не буде забезпечена. Тому напругу живлення зменшено дільником до рівня, приблизно, 150 мВ, відфільтровано і приведено до напруги 20 мВ в середньому положенні ротора підстроеного резистора R5 при напрузі живлення 5 В. Вхідний опір задається вибором номіналу резистора R4, а компенсація різниці вхідних струмів номіналів резисторів R4 і R3. Тепер про вихідний сигнал компаратора. Чому вибрано його інверсне уявлення? Відповідь проста. Тривалість фронту вихідного імпульсу в такому включенні набагато нижче і практично не залежить від ємності монтажу та вхідної ємності наступних ланцюгів. Справді розряд цих ємностей здійснюватиметься через відкритий вихідний транзистор компаратора.

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						40
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

В іншому випадку, ми мали б їх заряд через опір навантаження R2, який набагато більше опору відкритого вихідного транзистора. Відповідно до специфікації на LM211D ця відмінність часу тривалості фронту для навантаження в 500 Ом становить 4 рази (25 проти 100). Необхідно відзначити, що хороша розв'язка по ланцюгах живлення (елементи R1, C1, C2 і R9, C6) для таких пристроїв відіграє важливу роль. В іншому випадку перешкоди по ланцюгах живлення можуть порушити його роботу, особливо під час роботи з малими рівнями вхідних сигналів.

4.2 Бібліотека компонентів для AD

Використовуючи Altium Designer створимо бібліотеки елементів та футпринтів. Відобразимо цю інформацію у табл. 4.2.1.

Таблиця 4.2.1 — Зібрана таблиця зображень

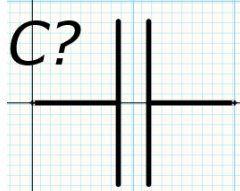

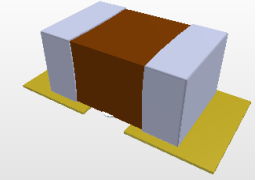
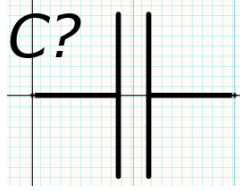
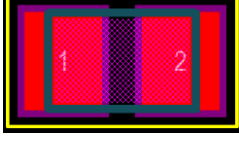
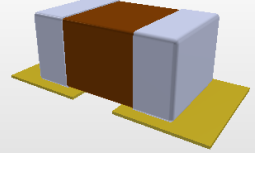
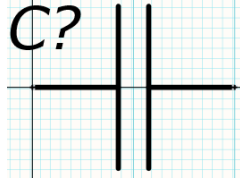
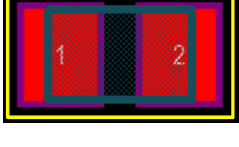
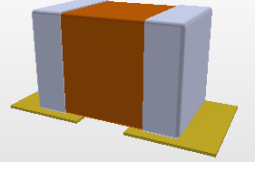
Компон.	Схематичне позначення	2D footprint	3D footprint
Резистор SMD080 5 100			
Резистор SMD080 5 150			
Резистор SMD080 5 1k			
Резистор SMD080 5 2k			
Резистор SMD080 5 20k			
Резистор SMD080 5 24k			

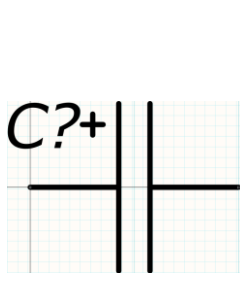
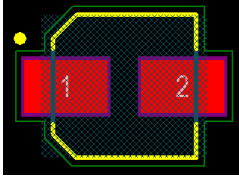
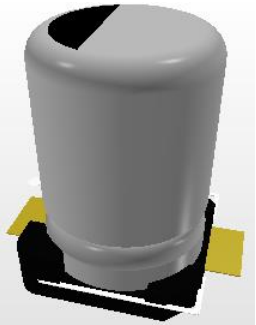
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

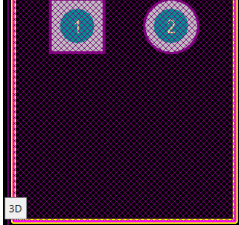
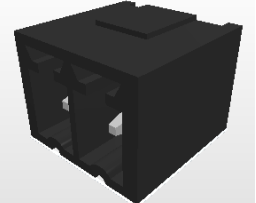
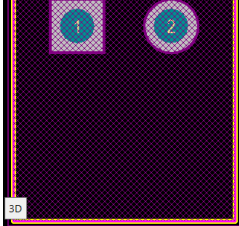
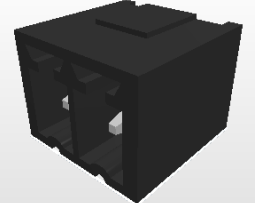
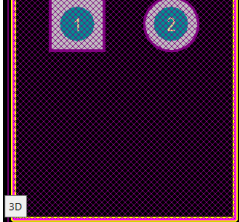
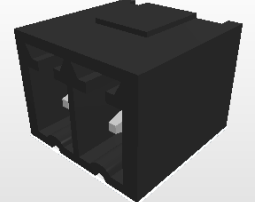
PT81.648342.001 ПЗ

Лис

41

<p>Конденсатор SMD080 5 22nF</p>			
<p>Конденсатор SMD080 5 100nF</p>			
<p>Конденсатор SMD080 5 1μF</p>			

<p>Полярный конденсатор SMDC 10μF 16V</p>			
---	--	---	--

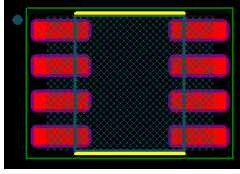
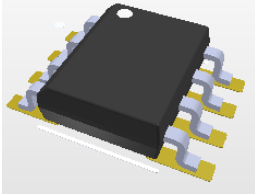
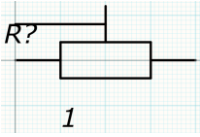
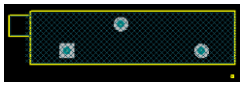
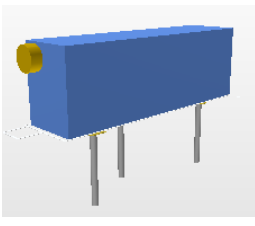
<p>Разъем</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">X? A1250WR-S-02P</th> </tr> <tr> <th>Коло</th> <th>Конт</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IN</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>GND</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	X? A1250WR-S-02P			Коло	Конт		IN	1	1	GND	2	2		
X? A1250WR-S-02P															
Коло	Конт														
IN	1	1													
GND	2	2													
<p>Разъем</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">X? A1250WR-S-02P</th> </tr> <tr> <th>Коло</th> <th>Конт</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IN</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>GND</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	X? A1250WR-S-02P			Коло	Конт		IN	1	1	GND	2	2		
X? A1250WR-S-02P															
Коло	Конт														
IN	1	1													
GND	2	2													
<p>Разъем</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">X? A1250WR-S-02P</th> </tr> <tr> <th>Коло</th> <th>Конт</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>+5V</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>-5V</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	X? A1250WR-S-02P			Коло	Конт		+5V	1	1	-5V	2	2		
X? A1250WR-S-02P															
Коло	Конт														
+5V	1	1													
-5V	2	2													

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PT81.648342.001 ПЗ

Лис

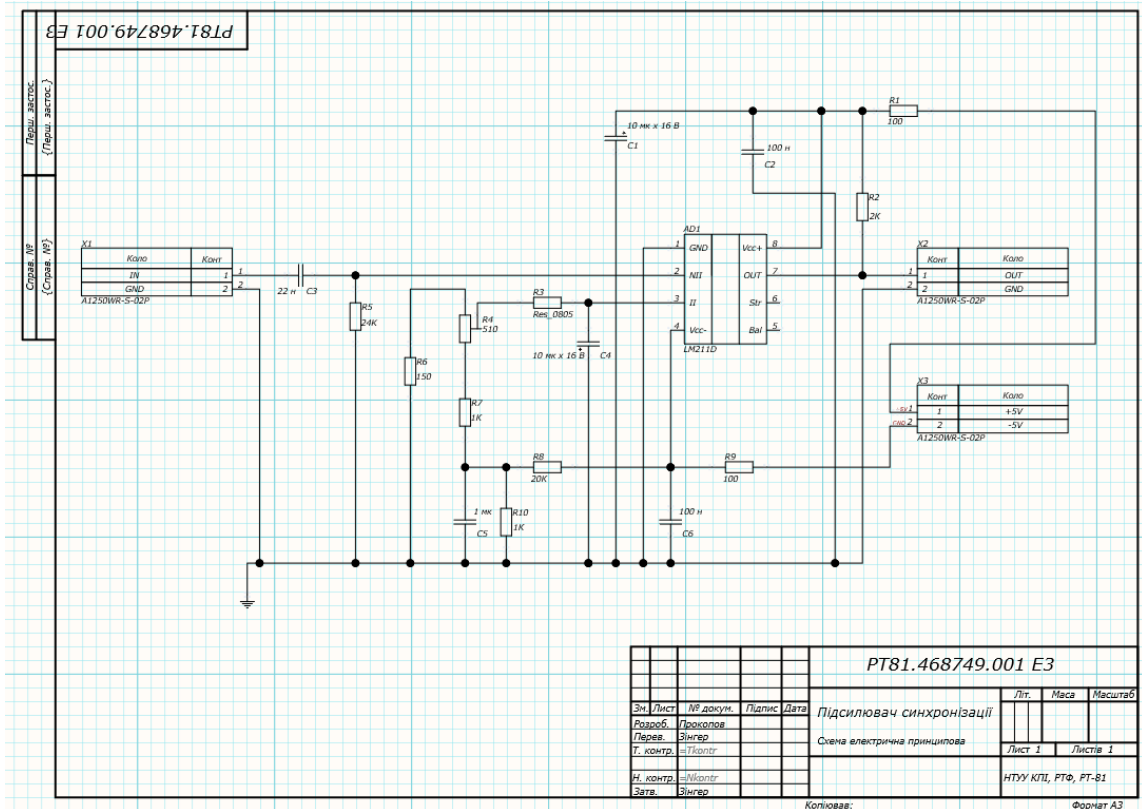
42

<p>Мікросхема LM221D</p>	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>GND</td> <td>Vcc+</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>NI1</td> <td>OUT</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>II</td> <td>Str</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Vcc-</td> <td>Bal</td> <td>5</td> </tr> </table>	1	GND	Vcc+	8	2	NI1	OUT	7	3	II	Str	6	4	Vcc-	Bal	5		
1	GND	Vcc+	8																
2	NI1	OUT	7																
3	II	Str	6																
4	Vcc-	Bal	5																
<p>Підстроювальний резистор, вивідний 510 Ом</p>																			

У даній таблиці наведено всі елементи, які будуть використовуватися при створенні мікросхеми.

4.3 Схема електрична принципова

Схема електрична принципова була побудована за допомогою програми Altium Designer та бібліотеки елементів, які були створені (.SchLib). В подальшому ця схема нам знадобиться для створення друкованої плати (ДП).



Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PT81.648342.001 ПЗ

Лис
43

Рисунок 4.3.1 — Схема електрична принципова

Під час проектування схеми електричної принципової помилок не виникало.

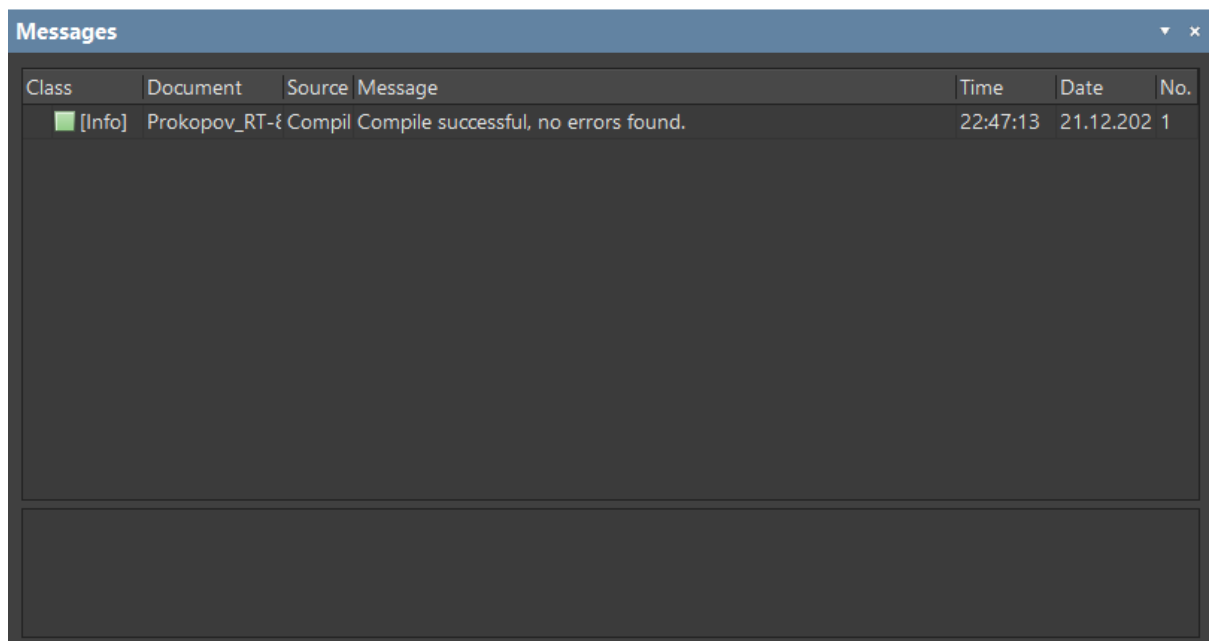


Рисунок 4.3.2 — Результати компіляції без помилок

4.4 Розрахунки

В якості матеріалу для своєї плати я обрав FR4 35/35 1.5.

Тип плати : двостороння

Тип встановлення елементів на плату: компоненти встановлені на обидві сторони (Клас С - змішана: монтовані в отвори і поверхнево монтовані компоненти).

Метод виготовлення плати: комбінований позитивний метод. Він застосовується для виробництва двохсторонніх друкованих плат. При використанні цього методу застосовуються фольговані діелектрики, але з меншою товщиною фольги. Подальше формування малюнка провідників відбувається шляхом гальванічного осадження міді з застосуванням фотошаблонів.

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						44
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

4.4.1 Розрахунок площі ДП

Для визначення площі плати потрібно розрахувати площі всіх елементів.

$$S_{\text{П}} = S_{\text{МГ}} + 1,5S_{\text{СГ}} + 2(3)S_{\text{ВГ}} + S_{\text{кр}}$$

$S_{\text{МГ}}$ - площа малогабартиних елементів;

$S_{\text{СГ}}$ - площа середньогабартиних елементів;

$S_{\text{ВГ}}$ - площа великогабартиних елементів;

$S_{\text{кр}}$ - площа кріпильних елементів.

Таблиця 4.4.1.1 — Площі елементів

Елемент	Площа	Кількість	Коефіцієнт
R1-R4, R6-R10	6.922	9	1
R5	140.142	1	1
C1,C4	28.333	2	1
C2,C6	7.008	1	1
C3	7.277	1	1
C5	6.601	1	1
AD1	40.096	1	2
X1-3	86.574	3	1

Сума площі всіх елементів (включаючи площу для кріпильних елементів)
– 1027 мм²

4.4.2 Розрахунок ширини провідників

Таблиця 4.4.2.1 — Параметри силової лінії друкованої плати

Тип лінії	Напруга, В	Струм, А	Ширина провідника, мм		Зазор, мм
			У вузькому	У широкому	
Силова	5	0.3	0.429	0.55	0,35
Сигнальна	5	0.006	0.3	0.55	0,35

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PT81.648342.001 ПЗ

Лис
45

Розрахунок розмірів перехідних отворів:

$$d = \gamma H$$

Діаметр контактної майданчика

$$D = d + \frac{2}{3}d$$

де d — діаметр перехідного отвору;

γ — константа для даного класу;

$$\gamma = 0,33$$

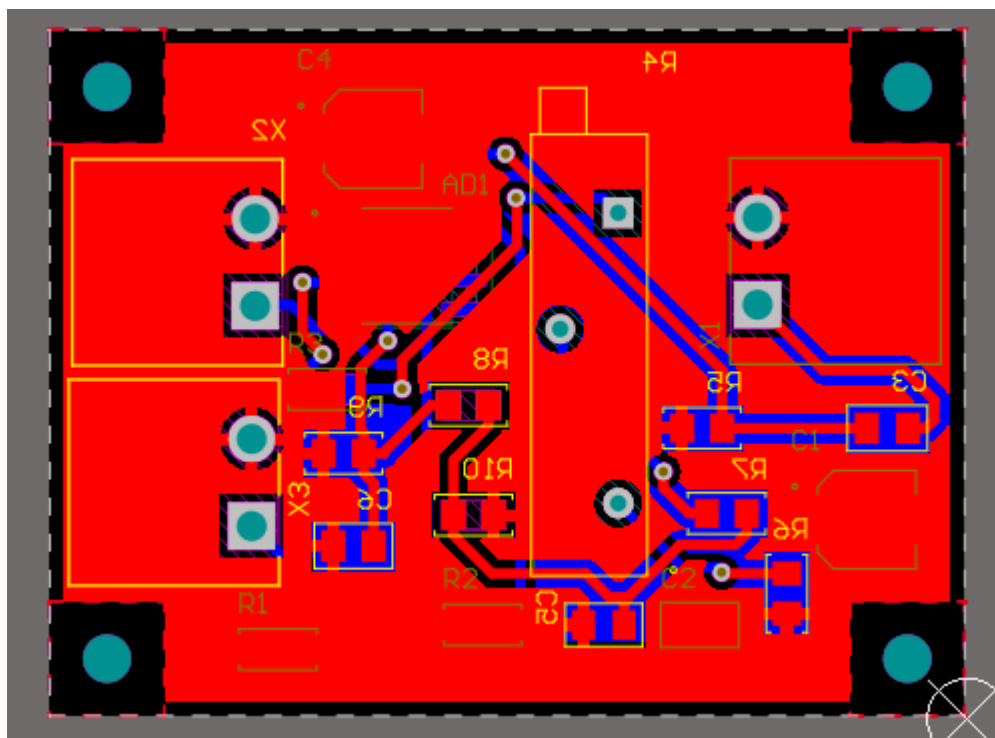
H — товщина плати;

$$H = 1,5$$

$$d = 0,495; D = 0,825$$

4.5 Трасування ДП

Відповідно до розрахункової площі у попередньому пункті – виберемо розміри 30 мм х 40мм.



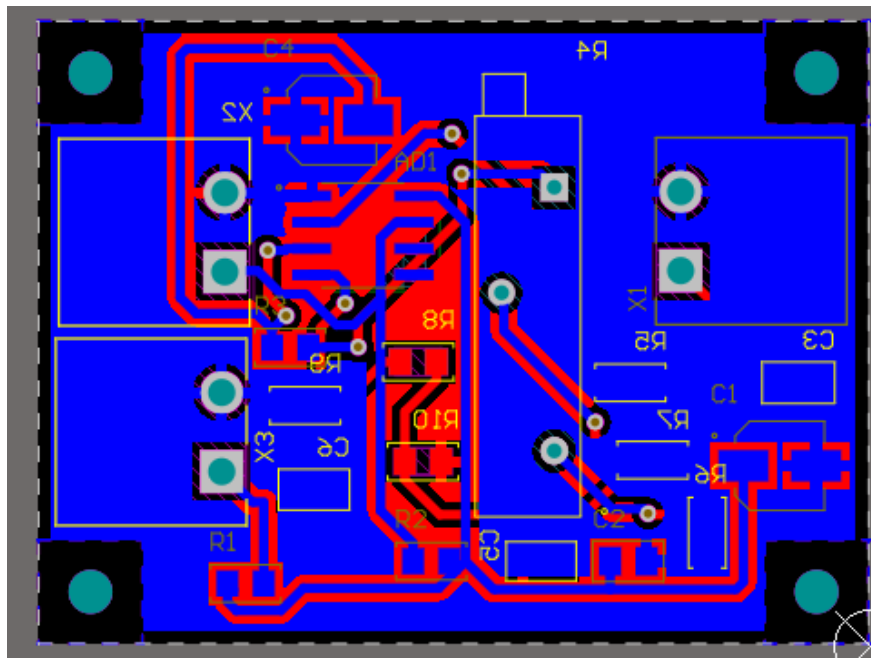


Рисунок 4.5.2 — Плата після трасування. Вид знизу;
3D вигляд плати та елементів

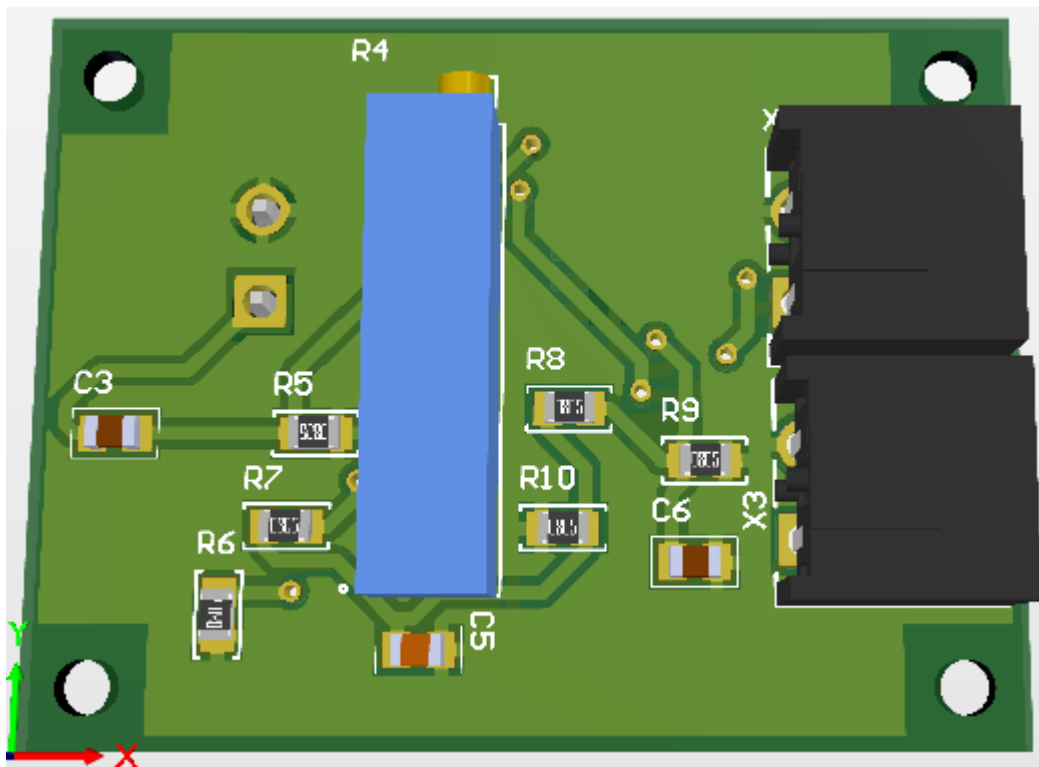


Рисунок 4.5.3 — Кінцевий вигляд плати. Вид зверху

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PT81.648342.001 ПЗ

4.6 Корпус

Далі плата була експортована у SolidWorks для побудови корпусу.

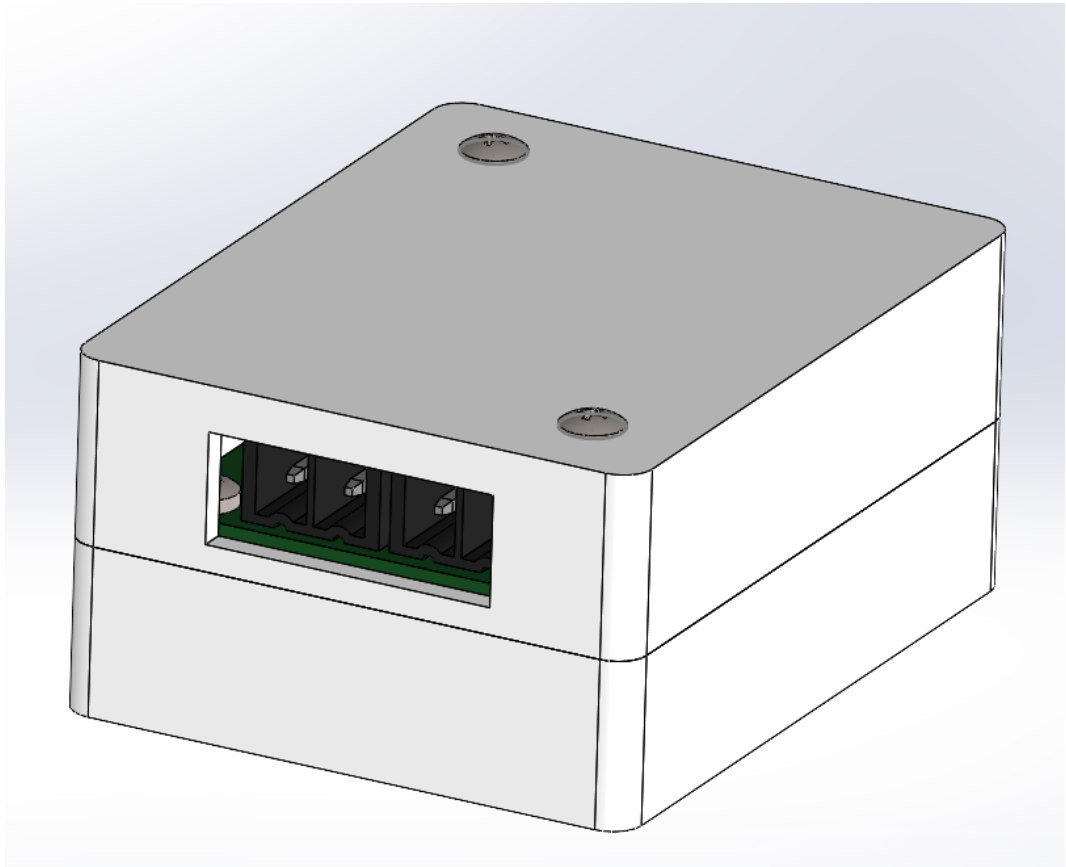


Рисунок 4.6.1 — Зовнішній вигляд корпусу

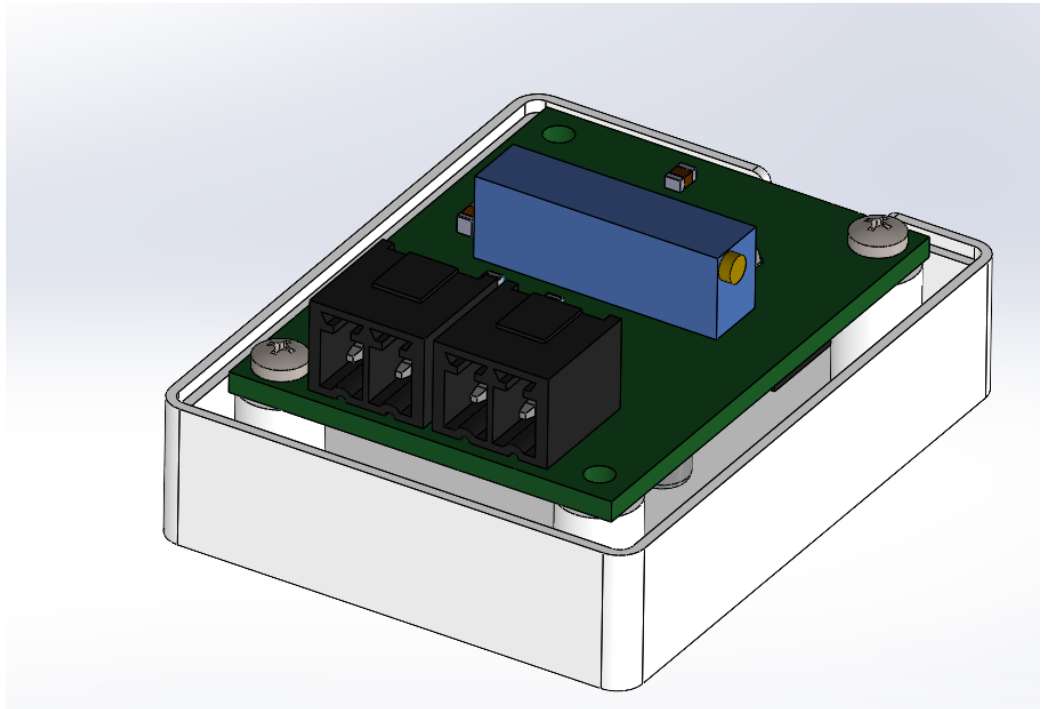


Рисунок 4.6.2 — Кріплення плати

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PT81.648342.001 ПЗ

Лис

48

4.7 Висновки

Отже, ДП для підсилювача імпульсів синхронізації РЕМ успішно спроектована та розроблена в середовищі AD. Основні параметри взяті до уваги при розрахунку площі ДП та ширини доріжок. Корпус пристрою розроблено в середовищі SOLIDWORKS 2021. Корпус виготовлено з легкого якісного пластику (ABS) чорного або сірого кольору з пластиковою кришкою.

Використання пластику є гарним рішенням у виконанні умов по захисту приладу від механічних ушкоджень. Для підвищення безпеки використання та покращення зовнішнього вигляду приладу, доцільно використати скруглення країв корпусу.

Плата кріпиться до корпусу за допомогою 2 болтів DIN 7049-ST2.2 x 6.5.

Кришка корпусу також надійно скріплюється двома болтами DIN 7049-ST2.2 x 16.

					<i>PT81.648342.001 ПЗ</i>	Лис
						49
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВИСНОВКИ

Провівши аналіз сучасних методів боротьби з БПЛА було встановлено, що найпростіший та найефективніший спосіб протидії беспілотним літальним апаратам є електронні нейтралізатори, засновані на використанні електромагнітних хвиль, здатних перервати (операції), вивести з ладу або навіть знищити (принаймні частково) беспілотник, а саме заглушення GNSS. Було розроблено та розраховано передавач завад, який працює на частоті GSM(900 МГц).

Після вибору елементної бази, розроблена друкована плата підсилювача імпульсів синхронізації РЕМ. Моделювання плат проводилося в програмному забезпеченні Altium Designer. Проектування корпусу виконано за допомогою середовища SolidWorks.

Розроблений пристрій задовольняє усім вимогам технічного завдання.

					<i>PT81.648342.001 ПЗ</i>	Лис
						50
<i>Зм.</i>	<i>Лис</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

10. https://drive.google.com/drive/folders/18X4RBB_uzhi4prWvh5KgCX9s6LBSesEu
11. <https://www.snapeda.com/>
12. <https://www.rcscomponents.kiev.ua/>
13. Стандарти ЕСКД, ЕСТД, ЕСТПВ
14. ГОСТ 23751-86 ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ Основные параметры конструкции
15. Белинский В.Т. Практическое пособие по учебному конструированию РЭА - К.: Высшая школа, 1992.
16. ДСТУ 3008:2015 «Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання».
17. Методичні вказівки до виконання практичних занять з дисципліни «Ра-діопередавальні пристрої» для студентів радіотехнічного факультету спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка / Уклад.: О.М. Антоненць, В.О. Дмитрук — К.: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2017. — 65 с..

					<i>PT81.648342.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		52

ДОДАТОК А

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіотехнічних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Керівник дипломного проекту

_____ Онисько А.І.

01 червня 2022 р

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту Прокопову Роману Олеговичу.

Тема проекту: «Передавач завад засобам навігації БПЛА»

Спроекувати передавач завад засобам навігації БПЛА, з наступними технічними характеристиками:

1. Потужність в навантаженні 20 Вт;
2. Параметри навантаження $R = 50 \text{ Ом}$;
3. Робочі частоти – частоти навігаційних систем ГЛОНАСС, GPS

Студент

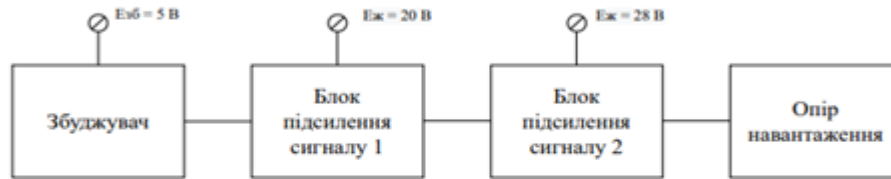
Прокопов Р.О.

					PT81.648342.001 ПЗ	Лис
						53
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б

ЕЗ 100'251894'18-1д

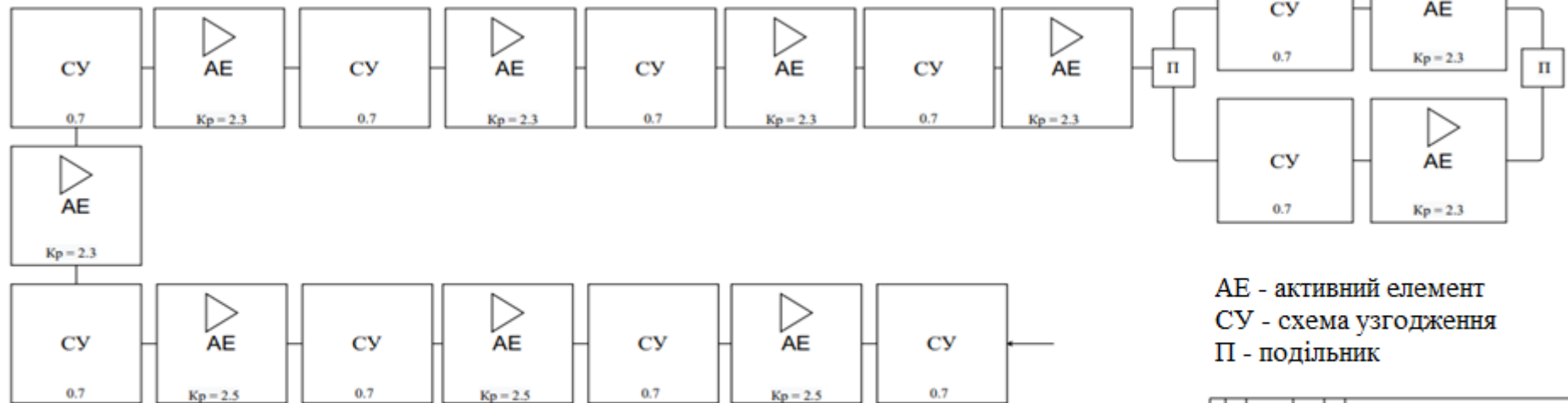
Повна структурна схема передавача завод



Структурна схема блоку підсилення 1



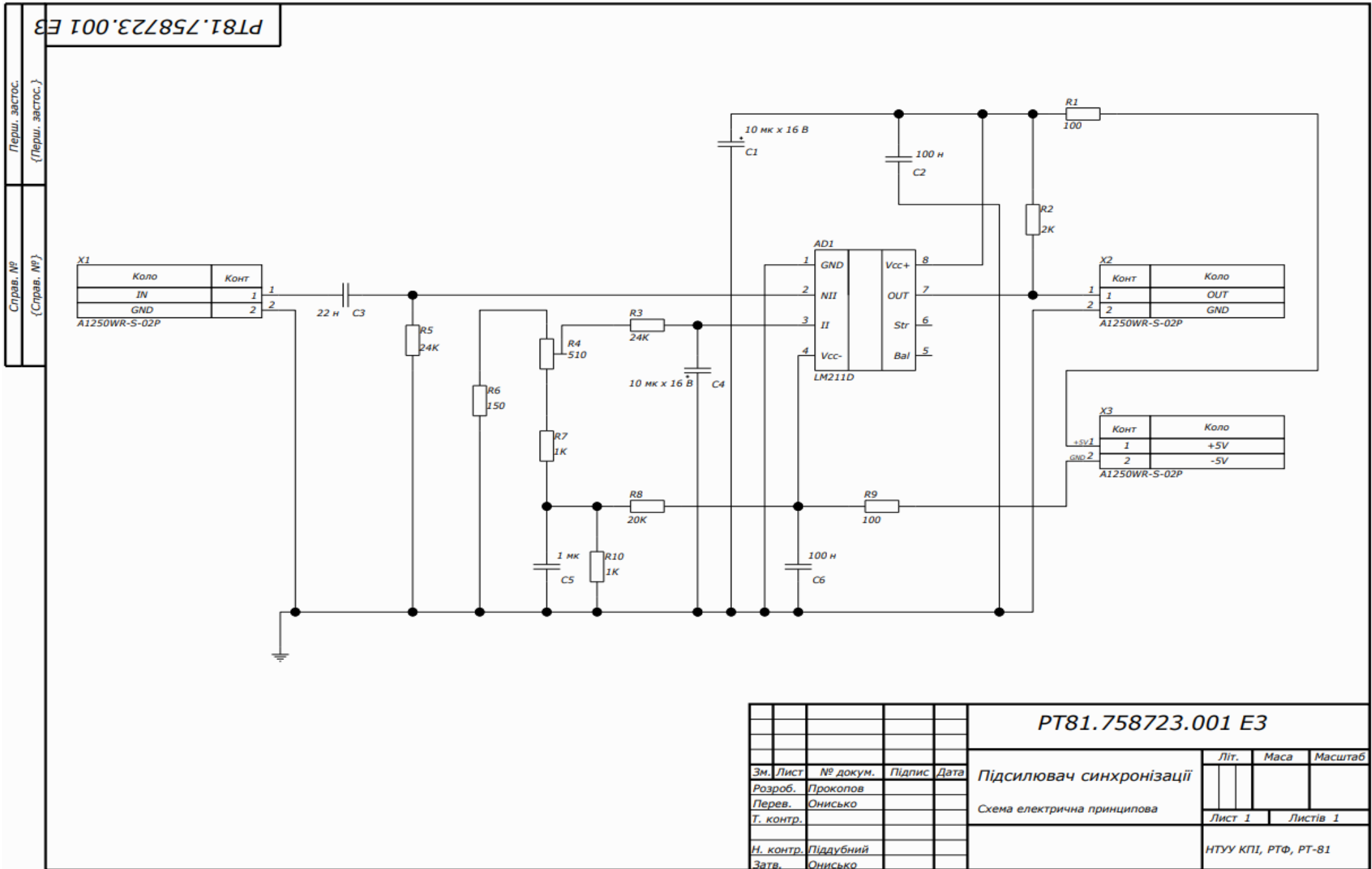
Структурна схема блоку підсилення 2



АЕ - активний елемент
 СУ - схема узгодження
 П - подільник

				PT-81.648342.001			
№	Дат.	Відомості	Підпис	Дата	Лист	Кількість	Всього
1		Лист			1		
				Передатчик заводський навігації В750А			
				Схема структурна			
				Лист 1 з 1			
				КТУУ АТЛ, Р10, РТ-81			

ДОДАТОК В

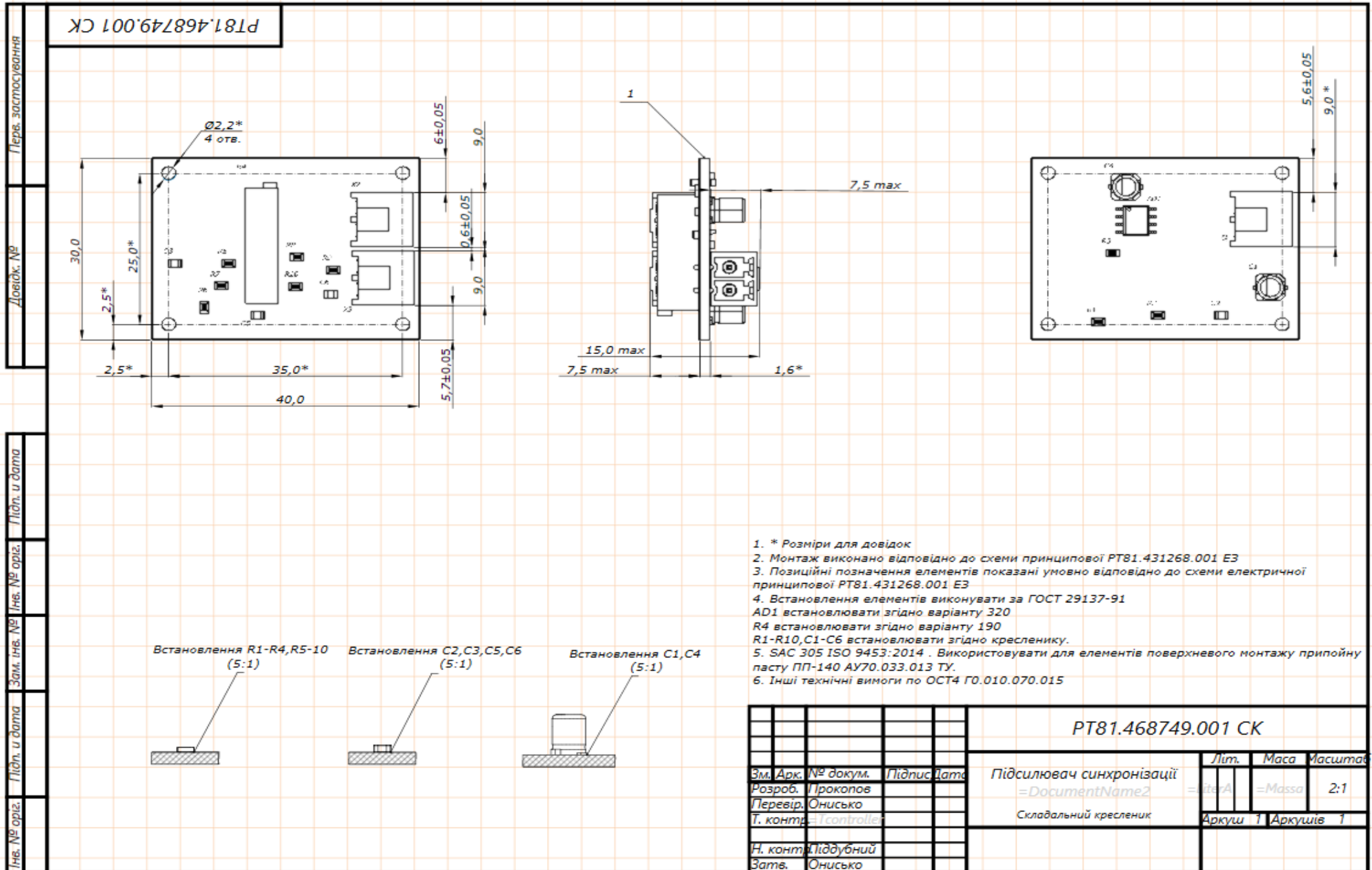


ПТ81.758723.001 Е3									
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Підсилювач синхронізації Схема електрична принципова	Літ.	Маса	Масштаб	
						Лист 1	Листів 1		
						НТУУ КПІ, РТФ, РТ-81			

ДОДАТОК Г

Позн.	Найменування	Кіл.	Примітки					
AD1	Мікросхема LM211D	1						
	<u>Конденсатори</u>							
C1, C4	EEE-1CA100NR-Panasonic 10мкФ 16В ±20%	2						
C2, C6	08055C104MAT2A-AVX 100нФ 50В ±20%	2						
C3	08055C223KAT2A-AVX 22нФ 50В ±10%	1						
C5	CL21B105KBANNC-Samsung 1мкФ 50В ±10%	1						
	<u>Резистори</u>							
R1, R9	RC0805FR-07100RL-Yageo 100 Ом 0,25 Вм ±1%	2						
R2	RC0805FR-072KL-Yageo 2 КОм 0,25 Вм ±1%	1						
R3, R5	RC0805FR-0724KR-Hitano 24 КОм 0,25 Вм ±1%	2						
R4	3006-P-1-511ZLF-Bourns 510 Ом 0,25 Вм ±10%	1						
R6	RC0805FR-07150RL-Yageo 150 Ом 0,25 Вм ±1%							
R7, R10	RC0805FR-071KR-Hitano 1 КОм 0,25 Вм ±1%	2						
R8	RC0805FR-0720KR-Hitano 2 КОм 0,25 Вм ±1%	1						
X1-X3	Роз'єм A1250WR-S-02P	3						
РТ81.468749.001 ПЕ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Підсилювач синхронізації Перелік елементів	Лім.	Арк.	Аркушів
Розробив		Прокопов					1	1
Перевір.		Онисько						
Реценз.								
Н.Контр		Піддубний						
Затверд.		Онисько						
						КПІ ім. Ігоря Сікорського, РТФ		

ДОДАТОК Д

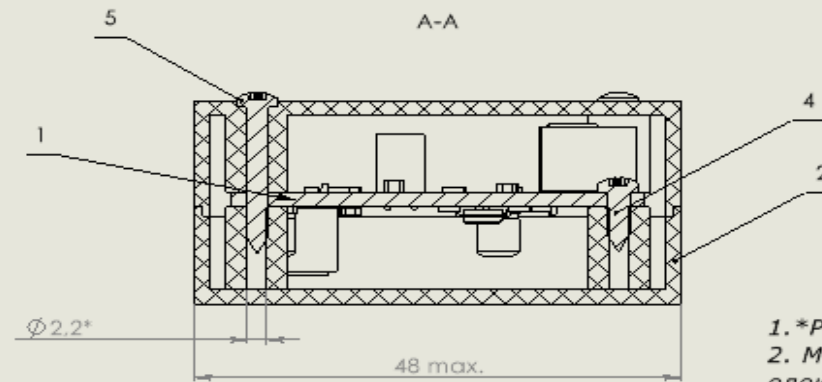
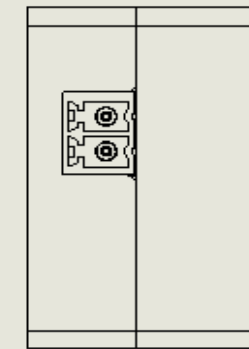
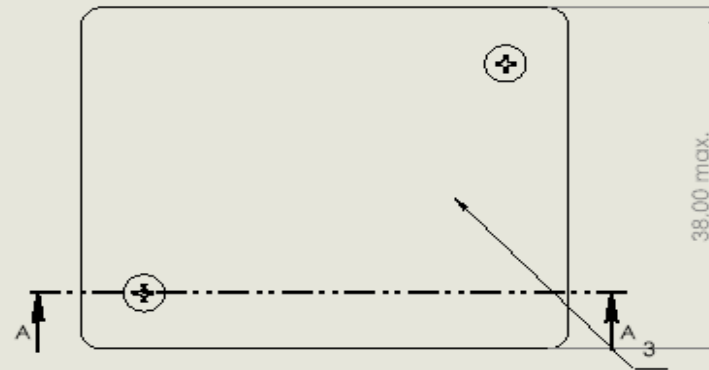
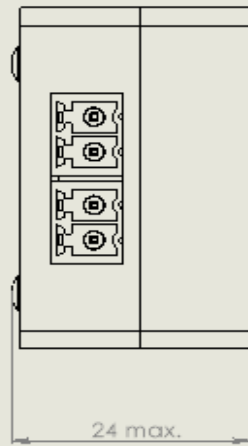


ДОДАТОК Е

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.		
				<u>Документація</u>				
A3			PT81.468749.001 СК	Складальний кресленик				
A3			PT81.468749.001 ЕЗ	Схема електрична принципова				
A3			PT81.468749.001 ПЕ	Перелік елементів				
				<u>Деталі</u>				
			PT81.758723.001	Друкована плата	1			
				<u>Вироби</u>				
				Мікросхема LM211D	1	AD1		
				EEE-1CA100NR-Panasonic 10мкФ 16В ±20%	2	C1,C4		
				08055C104MAT2A-AVX 100нФ 50В ±20%	2	C2,C6		
				08055C223KAT2A-AVX 22нФ 50В ±10%	1	C3		
				CL21B105KBANNC-Samsung 1мкФ 50В ±10%	1	C5		
				RC0805FR-07100RL-Yageo 100 Ом 0,25 Вт ±1%	2	R1, R9		
				RC0805FR-072KL-Yageo 2 КОм 0,25 Вт ±1%	1	R2		
			PT81.468749.001					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата				
Розроб..	Прокопов				Підсилювач синхронізації	Літ.	Арк.	Аркушів
Перев.	Онисько					1	2	
Т.конт						НТУУ КПІ, РТФ, РТ-81		
Н.конт	Піддубний							
Зате.	Онисько							

ДОДАТОК Є

PT81.468749.002 СК



- 1. *Розміри для довідок
- 2. Монтаж проводиться згідно схеми електричної принципової PT81.468749.001 ЕЗ
- 3. Інші технічні вимоги згідно ОСТ4.ГО.070.0

Листів. дришен.

Справ. №

Листів. і біла

Листів. № дубл.

Взам. ліне №

Листів. і біла

Листів. № дубл.

					PT81.468749.002 СК		
					Підсилювач		
					Лит.	Маса	Масштаб
Изм.	Лист	№ док.м.	Подп.	Дата			
Разраб.		Тракоплов					
Пров.		Онисько					
Т. кантр.							
Н. кантр.		Піддубний					
Утв.		Онисько					
					Лист		
					Листов		
					КПІ ім. Сікорського		

ДОДАТОК Ж

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.
				<u>Документація</u>		
A3			PT81.468749.002 СК	Складальний кресленик		
A4			PT81.468749.001 ПЗ	Схема електрична принципова		
				<u>Складальні одиниці</u>		
		1	PT81.468749.001	Друкований вузол	1	
				<u>Деталі</u>		
		2	PT81.732184.001	Корпус	1	
		3	PT81.732184.002	Кришка	1	
				<u>Інші вироби</u>		
		4		Болт DIN 7049-ST2.2 x 6,5	2	
		5		Болт DIN 7049-ST2.2 x 16	2	
				PT81.468749.001		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		
Розроб.		Прокопов			Лім.	Арк.
Перев.		Онисько				1
Т.конт						1
Н.конт		Піддубний			НТУУ КПІ, РТФ, РТ-81	
Затв.		Онисько				
					Підсилювач синхронізації	

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП РТ81.648342.001 ПЗ	Пояснювальна записка	53	
3	A3	ДП РТ81.648342.001	Структурна схема	1	
4	A3	ДП РТ81.758723.001 ЕЗ	Схема електрична принципова	1	
5	A4	ДП РТ81.468749.001 ПЕ	Перелік елементів	1	
6	A3	ДП РТ81.468749.001 СК	Складальний кресленик ЕМ	1	
7	A4	ДП РТ81.468749.001	Специфікація на ЕМ	2	
8	A3	ДП РТ81.468749.002 СК	Складальний кресленик пристрою	1	
9	A4	ДП РТ81.468749.001	Специфікація на пристрій	1	

				ДП РТ81.468749.001		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Прокопов Р.О.			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Онисько А.І.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. РТС Гр. РТ-81	
Н/контр.						
Зав.каф.						